



Dicle Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi

**mühendislikdersi**  
journal of engineering

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi  
**mühendislikdersi**  
Cilt: 10 Sayı: 3, Eylül 2019, 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**  
Muhammet Ali ARSERİM  
Abdulnasır YILDIZ  
Bilal GÜMÜŞ  
Sedat BİNGÖL  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU  
Kadir TURAN  
Halime ABAKAY TEMEL  
Mustafa AYHAN  
Abdurrahman SAYDUT  
Mehmet Emin ÖNCÜ  
Fevzi ÖNEN  
Halil GÖRGÜN  
Nizamettin HAMİDİ  
Gültekin AKTAŞ  
Mehmet Salih KESKİN

**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.*

- Ömer Faruk ERTUĞRUL (Batman Üniversitesi )  
Şükrü ÖZEN (Akdeniz Üniversitesi)  
Adnan SONDAŞ (Kocaeli Üniversitesi)  
Mehmet KAYA (Fırat Üniversitesi)  
Ali KARCI (İnönü Üniversitesi)  
Ferhat ATASOY (Karabük Üniversitesi)  
Mahmut Temel ÖZDEMİR (Fırat Üniversitesi)  
Baran HEKİMOĞLU (Batman Üniversitesi)  
İlhan UMUT (Trakya Üniversitesi)  
Taner TUNCER (Fırat Üniversitesi)  
Davut SEVİM (Batman Üniversitesi)  
Mahsa Moludpur (Ege Üniversitesi)  
Necdet Özbalta (Ege Üniversitesi)  
Mustafa Nalbantoğlu (Kilis 7 Aralık Üniversitesi)  
Muhammed Furkan KÜÇÜK (University of South Florida)  
Erdoğan AVAROĞLU (Mersin Üniversitesi)  
Hakan ÇELİK (Fırat Üniversitesi)  
Necmi DÜŞÜNCELİ (Aksaray Üniversitesi)  
Semih BENLİ (Aksaray Üniversitesi)  
Niyazi ÖZDEMİR (Fırat Üniversitesi)  
Cihan ÖZEL (Fırat Üniversitesi)  
Yahya HIŞMAN ÇELİK (Batman Üniversitesi)  
Mehmet Güven GÖK (Hakkari Üniversitesi)  
Mücahit SÜTÇÜ (İzmir Katip Çelebi Üniversitesi)  
Mustafa EROL (Dokuz Eylül Üniversitesi)  
Uğur ÇALIGÜLÜ (Fırat Üniversitesi)  
Erhan BOZKURTOĞLU (İTÜ)  
Zeynal Abiddin ERGÜLER (Dumlupınar Üniversitesi)  
Şakir ECE (Mardin Artuklu Üniversitesi)  
Niyazi BİLİM (Selçuk Üniversitesi)  
Alparslan TURANBOY (Necmettin Erbakan Üniversitesi)  
Hasan ÖZŞEN (Konya Teknik Üniversitesi)

Ahmet BENLİ (Bingöl Üniversitesi)  
Ercan IŞIK (Bitlis Eren Üniversitesi)  
Hakan DULKADİROĞLU (Nevşehir Üniversitesi)  
Gökmen ÖZTÜRKMEN (Gaziantep Üniversitesi)  
Veysel Süleyman YAVUZ (Siirt Üniversitesi)  
Fatih Üneş (İskenderun Teknik Üniversitesi)  
Güler ÖZKULA (Namık Kemal Üniversitesi)  
Hayrullah AKYILDIZ (DÜ)  
Muhammed Bahaddin KURT (DÜ)  
Yasin Sönmez (DÜ)  
Bilal GÜMÜŞ (DÜ)  
Muhammet Ali ARSERİM (DÜ)  
Atilla Gencer DEVECİOĞLU (DÜ)  
Ömer Faruk CAN (DÜ)  
Erol Kılıçkap (DÜ)  
Ahmet YARDIMEDEN (DÜ)  
Haluk KEJANLI (DÜ)  
Gurbet ÖRÇEN (DÜ)  
İbrahim DOLAK (DÜ)  
Mehmet Emin ÖNCÜ (DÜ)  
Senem YILMAZ ÇETİN (DÜ)  
Tamer BAĞATUR (DÜ)  
Nizamettin HAMİDİ (DÜ)  
Mehmet Salih Keskin (DÜ)  
Gültekin AKTAŞ (DÜ)  
Neslihan DALKILIÇ (DÜ)  
Ayhan BEKLEYEN (DÜ)  
Fevzi ÖNEN (DÜ)  
İdris BEDİRHANOĞLU (DÜ)

# İçindekiler / *Table of Contents*

## Elektrik Elektronik Mühendisliği / Electrical and Electronics Engineering

- 868 MHz UHF bandında H-şeklinde katlanmış implant mikroşerit dipol anten tasarımı  
(Araştırma Makalesi)  
*H-shaped implantable microstrip dipole antenna design at 868 MHz UHF band*  
(Research Article)  
**Mahmut Ahmet GÖZEL, Ömer KASAR, Mesud KAHRİMAN** **797**
- Frekans Seçici Yüzey Analizi Yöntemiyle Gerçekleştirilmiş 1.35 GHz Frekanslı Bant Durduran Süzgeç Tasarımı (Araştırma Makalesi)  
*Band Stop Filter Design at 1.35 GHz Frequency with Frequency Selective Surface Analysis*  
(Research Article)  
**Mehmet DUMAN** **807**
- İmge Şifreleme Yöntem ve Algoritmaları (Araştırma Makalesi)  
*Image Encryption Methods and Algorithms (Research Article)*  
**Nur Sena ATALAY, Şengül DOĞAN, Türker TUNCER, Erhan AKBAL** **815**
- Nokta Bulutları Üzerinden 3B Zernike Momentlerin Güçlü Bir Şekilde Hesaplanması  
(Araştırma Makalesi)  
*A Robust Calculation of 3D Zernike Moments from Point Clouds (Research Article)*  
**Erdal ÖZBAY, Ahmet ÇINAR** **833**
- Kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümü için atom arama optimizasyon algoritması  
(Araştırma Makalesi)  
*Atom search optimization algorithm for solving constrained optimization problems*  
(Research Article)  
**Erdal EKER, Murat KAYRI, Serdar EKİNCİ** **841**
- RSA algoritmasının şifreleme hızını arttıran algoritmalar ve performansları  
(Araştırma Makalesi)  
*Algorithms and performances increasing the encoding speed of rsa algorithm*  
(Research Article)  
**Tarık YERLİKAYA, Canan ASLANYÜREK** **853**
- Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santralinin şebeke ile paralel çalışmasında olası adalaşma probleminin Matlab simülasyon ortamında değerlendirilmesi  
(Araştırma Makalesi)  
*A new approach to rate of change of frequency relay preventing islanding in local power*  
(Research Article)  
**Sadi Serdar GÜNELİ, Muhammet Ali ARSERİM, Rıdvan KENANOĞLU** **863**
- Comparative assessment of five metaheuristic methods on distinct problems  
(Research Article)  
**Ali MORTAZAVİ** **879**

DC Motor Sürücüsü İçin Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı (Araştırma Makalesi) <i>Model Predictive Controller Design for DC Motor Drive (Research Article)</i> <b>Ammar BAWDAKA, İbrahim KAYA</b>	<b>899</b>
<i>A Hardware and Mobile-Health Based System for the Analysis of EEG Signals (Research Article)</i> <b>Turgay KAYA, Seda ARSLAN TUNCER</b>	<b>911</b>
Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin Harmoniklerine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması (Araştırma Makalesi) Harmonics effects of grid connected solar power plant (Research Article) <b>Emre NEDİMOĞLU, Bilal GÜMÜŞ</b>	<b>919</b>

## **Makina Mühendisliği / Mechanical Engineering**

Dalgalı trapez plakalı ısı eşanjörü içindeki nanoakışkanların akış ve ısı transfer karakteristiklerinin incelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of flow and heat transfer characteristics of corrugated trapezoidal plate heat exchangers using nanofluids (Research Article)</i> <b>Elif BÜYÜK ÖĞÜT, Seda DİLKİ</b>	<b>933</b>
Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi (Araştırma Makalesi) <i>Experimental and numerical analysis of Charpy impact test (Research Article)</i> <b>Mustafa ALBAYRAK, Mete Onur KAMAN</b>	<b>945</b>
Elektroforetik Yöntem Kullanılarak Mg-AZ 31 Alaşımının Go/Hap ile Kaplanması ve Sinterleme Sıcaklığının Yüzeyin Mikroyapısına Etkilerinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Investigation of The Effect of The Sintering Temperature on The Microstructure of The Go/Hap Composite Film Electrophoretically Deposited on The Mg-AZ31 Alloy Surface (Research Article)</i> <b>Erkan BAHÇE</b>	<b>959</b>
Mikroalaşımli Hardox 400 Çelik Yüzeyinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemiyle Alaşımlandırılması ve İncelenmesi (Araştırma Makalesi) <i>Alloying and Investigation of Microalloyed Hardox 400 Steel Surface by Plasma Transfer Arc Welding Method (Research Article)</i> <b>Ali Kaya GÜR, Muhammet Hulusi CENGİZ, Semih TAŞKAYA</b>	<b>969</b>
85/15 Bronz Kompozitinde Ni İlavesinin Üretim Parametrelerinde Elektriksel İletkenliğe Etkisi (Araştırma Makalesi) <i>The Effect on Electrical Conductivity of Production Parameters of Ni Addition at 85/15 Bronze Composite (Research Article)</i> <b>Tülay YILDIZ, Ali Kaya GÜR, Nafiz BOZKURT</b>	<b>981</b>

- Seramik Sırlama Makinesi Pnömatik Eyleyici Sisteminin Tasarımı ve Sistemin İmalatı  
(Araştırma Makalesi)  
*The Design of a Pneumatic Actuator System for Ceramic Glazing Machine and  
Manufacturing of the System (Research Article)*  
**Erhan AÇIKGÖZ, Elif Erzan TOPÇU** **989**

## **Maden Mühendisliği / Mining Engineering**

- Asidik dağlama prosesinde farklı HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının titanyumun yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkisi (Araştırma Makalesi)  
*The effect of different HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ratio of the acid etching process on the surface morphology and roughness of titanium (Research Article)*  
**Tuncay DİKİCİ** **999**

- Ferromolibden ve ferrobör takviyeli lazer kaplamaların aşınma karakteristiği ve mikroyapısı (Araştırma Makalesi)  
*Wear characteristics and microstructure of ferromolybdenum and ferrobör reinforced laser claddings (Research Article)*  
**Hülya DURMUŞ, Nilay ÇÖMEZ, Canser GÜL, Melis YURDDAŞKAL, Recep Onur UZUN** **1009**

- Tarihi eserlerde doğal yapıtaşı olarak kullanılan Lefke taşının (Osmaneli/Bilecik) jeolojik ve mühendislik özellikleri (Araştırma Makalesi)  
*Geological and Engineering Properties of Lefke Stone (Osmaneli /Bilecik) used as Natural Building Stone in Old Structures (Research Article)*  
**H. Haluk SELİM, Ahmet KARAKAŞ, Özkan CORUK** **1019**

- Altın nanomalzeme sentezi ve karakterizasyonu (Araştırma Makalesi)  
*Gold nanomaterial synthesis and characterization (Research Article)*  
**Mehmet Fırat BARAN, Abdurrahman SAYDUT** **1033**

- Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 jeotermal sondajında kontrolsüz püskürmenin önlenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Preventing blow out in the Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 geothermal borehole (Research Article)*  
**İbrahim Utku ERMİŞ** **1041**

## **İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering**

- Betonarme Yapılarda Farklı Kat Sayıları için Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi (Araştırma Makalesi)  
*Effect of infill walls on earthquake behavior of reinforced concrete structures with different floors (Research Article)*  
**Tuba DEMİR, Erkut SAYIN** **1049**

- Enerji geri kazanımı için arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonu (Araştırma Makalesi)  
*Hydrothermal carbonization of sewage sludge for energy recovery (Research Article)*  
**Sibel BAŞAKÇILARDAN KABAĞCI, Doğançan KOCA** **1061**

- CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar parametrik analizleri  
(Araştırma Makalesi)  
*Modeling and analysis of strengthened reinforced concrete beams with CFRP by finite element method (Research Article)*  
**Zeynep FIRAT ALEMDAR, Nasibe İNKAYA** **1073**
- Dicle Nehri'nin taşkın analizinin HEC-RAS programı ile yapılması (Araştırma Makalesi)  
*Floodplain analysis Of Tigris River using HEC-RAS Software (Research Article)*  
**Selman OĞRAŞ, Fevzi ÖNEN** **1087**
- Sarsma masası testlerindeki dinamik parametrelerin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi  
(Araştırma Makalesi)  
*Measurement of dynamic parameters in shaking table tests with image processing method (Research Article)*  
**Neslihan AVCI, Fatih ALEMDAR** **1099**
- Destek Vektör Makineleri ve M5 Karar Ağacı Yöntemleri Kullanılarak Yağış-Akış İlişkisinin Tahmini (Araştırma Makalesi)  
*Estimation of rainfall-runoff relationship using support vector machines and M5 decision tree methods (Research Article)*  
**Mustafa DEMİRCİ** **1113**
- Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Investigation of Composite Marine Structure under Wave Loads (Research Article)*  
**Engin GÜCÜYEN, Recep Tuğrul ERDEM** **1125**
- Elektroosmoz ve Isıl İşlemler Yöntemleri İle Zeminlerin İyileştirilmesi ve Stabilizasyonu  
(Araştırma Makalesi)  
*Improvement and Stabilization of Soils by Electroosmosis and Heat Treatment Methods (Research Article)*  
**Mehmet Hayrullah AKYILDIZ** **1137**
- Yeniden işlevlendirilen Hasan Paşa Hanı'nın kullanım sonrası değerlendirilmesi  
(Araştırma Makalesi)  
*Evaluation of the refunctional hasan pasha khan after use (Research Article)*  
**Mehmet CEBE, Nurtekin ÖZEN, Can Tuncay AKIN** **1145**
- Temiz Su Koşulları Altında Dairesel Köprü Ayaklarının Etrafındaki Nihai Oyulma Derinliklerinin Deneysel Araştırılması (Araştırma Makalesi)  
*Experimental Investigation of Final Scour Depths Around Circular Bridge Piers Under Clear Water Conditions (Research Article)*  
**Fırat Gümgüm, Ayşegül Ö. Aksoy, M. Şükrü Güney** **1165**
- Kesme Etkin Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan Kafes Kiriş Analogisi ile Modellenmesi (Araştırma Makalesi)  
*Modeling of Shear-Critical Reinforced Concrete Elements with Nonlinear Truss Analogy (Research Article)*  
**Sadık Can GİRGIN** **1177**
- The Effect of Soil Type and Different In-situ Test Results on Soil Amplification Analysis (Research Article)*  
**Murat TÜRKÖZ** **1187**



---

Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi (DÜMF) Mühendislik Dergisi yayınlarında varılan sonuçlar veya fikirlerin sorumluluğunu taşımamaktadır. Üniversite'nin, bu yayında ileri sürülen bilgi, alet, ürün veya işlemin 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.



## 868 MHz UHF bandında H-şeklinde katlanmış implant mikroşerit dipol anten tasarımı

**Mahmut Ahmet GÖZEL\***

Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta  
[mahmutgozel@sdu.edu.tr](mailto:mahmutgozel@sdu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0360-7188, Tel: (246) 211 1367 (1747)

**Ömer KASAR**

Artvin Çoruh Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin  
[omerkasar@hotmail.com](mailto:omerkasar@hotmail.com) ORCID: 0000 0003 1859 5236

**Mesud KAHRİMAN**

Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta  
[mesudkahrیمان@sdu.edu.tr](mailto:mesudkahrیمان@sdu.edu.tr) ORCID: 0000 0003 0731 0936

Geliş: 18.07.2018, Revizyon: 31.08.2018, Kabul Tarihi: 11.09.2018

### Öz

Vücuda yerleştirilebilir anten uygulamaları, biyomedikal mühendisliğinde çokça çalışılan güncel bir konudur. Vücuda yerleştirilebilen devreler sayesinde hareketli hastaların takibi ve tedavi yöntemlerinde de her geçen gün yenikler ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak ta yeni çalışma alanları ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada vücuda yerleştirilebilen biyomedikal antenler üzerine yeni bir tasarım önerilmiştir. Vücuda yerleştirilecek antenlerin tasarımında birçok zorluk vardır. Burada anteni çevreleyen doku ve bu dokuları da çevreleyen diğer dokuların dielektrik ve geometrik özelliklerinin doğru tespit edilmesi, antenin tasarım ve benzetimi açısından oldukça önemli bir konudur. Bu çalışma için önerilen anten deri ve yağ doku arasında konumlandırılmış ve farklı dokular ile anten birlikte tasarlanarak simüle edilmiştir. Bu anten, elektromanyetik teori ve sonlu elemanlar metodunun uygulandığı bir benzetim programı ile bazı uzunluk parametreleri referans alınarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Simülasyon H şeklinde katlanmış mikro şerit dipol anten ile biyolojik doku ortamından oluşmaktadır. Doku ortamı 3 farklı katmandan meydana gelmektedir: Kas ( $31 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$ ), yağ ( $31 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ ), deri ( $31 \times 30 \times 2.1 \text{ mm}^3$ ). Antenin yerleştirildiği bölge deri ile yağ katmanı sınırındadır. Bu çalışma tasarlanan antenin rezonans frekansı UHF bandında 868MHz'dir. Antenin gerçekleştirilebilmesi için alt taş malzeme olarak yaygın kullanılan FR4 kullanılmıştır. Bu çalışmada doku içi uygulama için önerilen antenin boyutları  $16 \times 15 \times 1.5 \text{ mm}^3$  olarak tasarlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İmplant Anten; H-şeklinde mikroşerit dipol; Doku içi anten tasarımı; Özgül Soğurma Oranı (Specific Absorption Rate, SAR)

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Günümüzde radyo frekansı ve mikrodalga uygulamalar, biyomedikal alanlarda, hastalığın önlenmesi, teşhisi ve tedavisi aşamalarında önemli katkılar sağlamaktadır (Rosen, Stuchly, & Vander Vorst, 2002). Biyomedikal cihazlarda anten kullanımı; teşhis amaçlı görüntüleme sistemleri (Çelik, Kurt, & Helhel, 2016; Çelik, Kurt, & Helhel, 2018), radyoterapi sistemleri vücut içindeki protezlerin kimliklendirilmesi ve takibi ve yine vücuda takılabilen güvenlik cihazlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Gözel, Çağlar, & Doğan, 2016; F Merli, Bolomey, Meurville, & Skrivervik, 2008).

EM (Elektromanyetik dalgaların) kullanıldığı biyomedikal uygulamalarda biyolojik doku içine anten yerleştirilmesi gerekmektedir. İnsan vücuduna yerleştirilen bu anten, hasta takibi, hastalıkların teşhisi gibi işlemler için ortamda bulunan cihazlarla kablosuz haberleşmeyi sağlar. İnsan vücuduna implant edilebilir devreler ile ilgili çalışmalar; kalp pilleri ve hassas algılama yeteneğine sahip haplarla 1960lı yılların başında uygulanmaya başlanmıştır. İmplant edilebilir cihazlara olan eğilim beraberinde yeni sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Hasta vücuduna yerleştirilen antenler hasta ile ilgili verileri toplar ve vücut dışında bulunan baz istasyonlarına bu verileri aktarmayı hedefler. Fakat doku ortamı ve çevresel faktörler verilerin aktarılmasında iyileştirme ihtiyacı gerektirir (Panescu, 2008). Bu aşamada antenin doku ortamına uygun boyutlarda ve veri aktarımı sağlayabilecek kazanca sahip özellikleri ihtiva etmesi oldukça önemlidir (Bashirullah, 2010).

Doku içerisine yerleştirilen antenler uygulama açısından geniş bir yelpazeye sahiptir. İnsan ve hastalık takibinin yanı sıra hayvanlarda da doku içerisine yerleştirilen antenler sayesinde pH ve sıcaklık değerleri ile hastalıkların teşhisi ve ön tanı yöntemleri geliştirilmiştir (H. Doğan, Çağlar, Yavuz, & Gözel, 2016). Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte doku içerisine yerleştirilen antenler, hastalık teşhisi/tedavisi

yöntemlerinde, RFID uygulamalar ile entegre çalışmalarda kendini göstermektedir (X. Liu, Stachel, Sejdic, Mickle, & Berger, 2013). Bununla birlikte insan vücuduna yerleştirilen protezlerin takibi ve vücut içerisinde ne gibi etkilere sebep olduğu bilgisi protez üzerine yerleştirilen antenler ile sağlanmaktadır (Gözel & Çağlar, 2016).

RF (Radyo Frekansı) Enerji hasatlama yöntemi ile vücut içerisine yerleştirilmiş devrelerin pil ihtiyacı gibi konulara olan eğilim son yıllarda iyice artmaktadır (S. Kim et al., 2014; Xue, Cheng, & Je, 2013). Bununla birlikte yaygın olarak hastaların sağlık durumlarının uzaktan izlenebilmesi amacı ile kullanılan WBAN (Wireless Body Area Network) sistemlerde de vücut içine yerleştirilmiş sensörler ve anten sayesinde hastalık teşhisi ve tedavisi ile ilgili veri toplanabilir bu veriler kablosuz olarak aktarılabilir (Kang, Wu, & Tarnag, 2012; Yang & Yang, 2006).

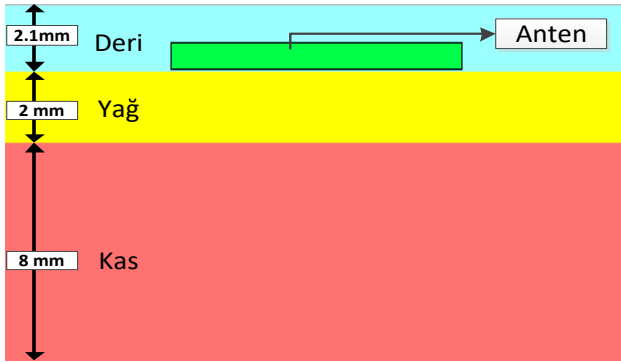
Görüldüğü gibi hastalıkların teşhis ve tedavisi gibi durumlarda yukarıda saydığımız birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin hemen hemen hepsinde vücut içerisinden kablosuz olarak veri elde edebilmek veya güç aktarabilmek için implant edilebilir bir antene ihtiyaç duyulmaktadır. Bu anten hem vücut içerisine yerleştirilebilir boyutlarda olmalı hem de veri aktarabilir EM özellikleri ihtiva edebilmelidir. Ayrıca antenin vücut dokusu ile uyumlu olması da önemli bir parametredir.

## Materyal ve Yöntem

### Doku Ortam Özellikleri ve Tasarımı

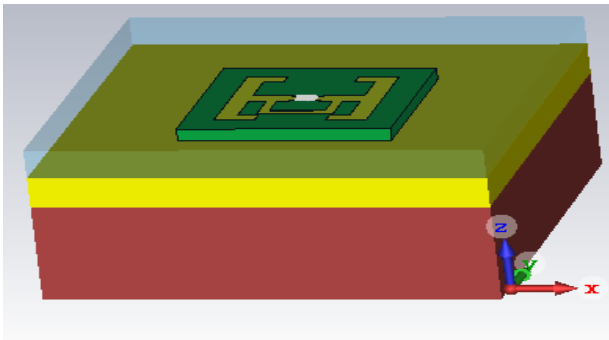
İmplant anten geometrisi ve tasarımı ile doku ortamı birbirini doğrudan etkiler. RF sinyalin zayıflamasına sebep olan doku ortamını oluşturan katmanlar ve bu katmanların boyutları; anten geometrisi, çalışma frekansı ve kazancı önemli ölçüde değiştirir (Barnes & Greenebaum, 2006; Polk & Postow, 1995). Doku ortamı çoğu zaman, çalışmanın kullanılacağı bölgeye göre vücudun bazı

kısımları için tasarlanmaktadır. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda doku özellikleri ve tasarımları göz önünde bulundurularak (Cheng & Herman, 2011; Doddipalli, Kothari, & Peshwe, 2017; Wessapan & Rattanadecho, 2018), bu çalışmada kas, yağ ve deri tabakasını içeren bir doku modeli gerçekleştirilmiştir. Doku modeli tasarımının gerçekleştirilmesinde kas, yağ ve deri dokularının vücudun hemen hemen her bölgesinde bulunabilmesi göz önünde bulundurulmuştur.



Şekil 1. Antenin ortamı doku modeli

Şekil 1’de gösterilen biyolojik dokuların fiziksel ve elektriksel özellikleri anten boyutunu ve RF sinyal iletimini etkiler (Wessapan & Rattanadecho, 2018). Doku dielektrik ve fiziksel özellikleri geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar referans alınarak seçilmiştir (Cheng & Herman, 2011; Doddipalli et al., 2017; Wessapan & Rattanadecho, 2018). Burada doku modeli içerisindeki antenin; deri ile yağ doku sınırına yerleştirilmesi cerrahi operasyon kolaylığı ve anten veriminin artırılması açısından gerekli görülmüştür.



Şekil 2. Antenin doku içerisindeki tasarımı

Bu çalışmada tasarlanmış implant antenin de yerleştirildiği üç boyutlu vücut dokusu simülasyon tasarımı Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2’de gösterilen doku ortamı ve anten CST Microwave Studio ile tasarlanmıştır.

Tablo 1. Tasarıma ait doku ebatları ve 868MHz’deki dielektrik özellikleri

Doku Katmanı	Doku Tasarım Ebatları [mm <sup>3</sup> ]	Dielektrik Özellikler @868 MHz		
		$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\tan\delta_c$
Deri	31×30×2,1	41,53	0,858	0,424
Yağ	31×30×2	5,46	0,050	0,189
Kas	31×30×8	55,08	0,934	0,348

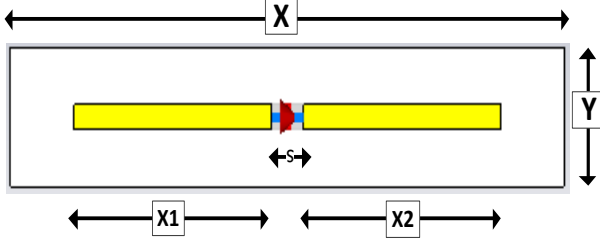
Tablo 1’de Simülasyon çalışması yapılan üç farklı dokuya ait dielektrik özellikler ("Institute of Applied Physics,") ve doku katmanlarına ait ebatlar (Cheng & Herman, 2011) verilmiştir. Ayrıca bu dokular CST kütüphanesinde de bulunmaktadır. Şekil 1’ de yağ doku ve deri sınırına yerleştirilen anten FR4 alt taş malzemesi üzerine yapılmıştır.

### Doku İçi Anten Tasarımı ve Simülasyonu

Anten tasarım aşaması bu çalışmanın en kritik kısmıdır. İmplant anten vücut içerisine yerleştirildiği için bu antenin konumu antenin çalışma frekansını ve kazancını etkilemektedir. Doku dielektrik özellikleri ve ebatları antenin çalışma frekansını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma için antenin çalışma frekansı UHF bandında ülkelere ayrılan frekans aralığı göz önünde bulundurularak ortalama bir değer olan 868MHz olarak seçilmiştir ("BTK, Bilgi Teknolojileri ve İletişimi Kurumu, Milli Frekans Planı ve Diğer Planlar,").

Bu çalışmada yaygın kullanılan implant anten türlerinden (Houzen, Takahashi, Saito, & Ito, 2008; Karacolak, Hood, & Topsakal, 2008; J. Kim & Rahmat-Samii, 2004; Kiourti, Christopoulou, Koulouridis, & Nikita, 2010; Soontornpipit, Furse, & Chung, 2004) farklı olarak mikroşerit dipol anten temeline dayanan katlanmış H-şeklinde anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımın seçilmesinde; tasarım gerçekleştirilmesinin kolay olması, besleme

yönteminin uygulanabilirliği, boyutların seçilen frekans bandına göre küçük olması ve simetrik olması sebebiyle anten geometrisinde parametrik çalışmanın kolay yapılabilmesi gibi sebepler etkili olmuştur.



Şekil 3. Mikroşerit Dipol Anten Modeli

Yaygın kullanılan mikroşerit dipol antenlerin doku ortamı olmaksızın çalışma frekansına göre kapladığı alan hesaplanabilir. Şekil 3’de gösterilen bir mikroşerit dipol antenin dalga boyu aşağıdaki formüller yardımıyla bulunabilir. Böylece  $\lambda/2$  uzunlukta bir antenin boyu hesaplanabilir (Balanis, 1992).

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{T}{Y} \right]^{-1/2} \quad (1)$$

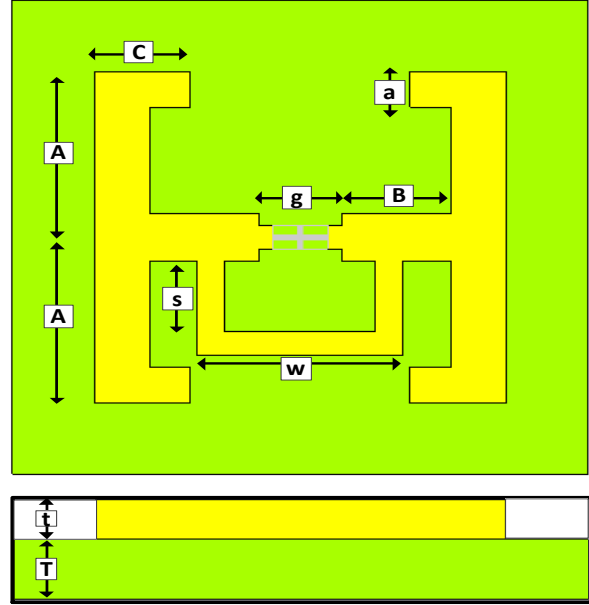
$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2)$$

Burada;

- $\epsilon_{eff}$  = Etkin dielektrik sabiti,
- $\epsilon_r$  = Dielektrik sabiti,
- $T$  = Taban malzemesine ait kalınlık,
- $Y$  = Mikroşerit hattın genişliği,
- $f$  = Çalışma frekansı,
- $c$  = Işık hızı,
- $\lambda$  = Dalga boyunu ifade eder.

Fakat bu çalışmada olduğu gibi anten doku içerisine yerleştirildiğinde yüksek oranda kayıplı ve sinyal dağıtıcı bir ortama girmiş olur. Bu ışımaya elemanını etrafındaki kayıplı dokular anten performansını önemli ölçüde değiştirir. Bu durum antenin elektriksel uzunluğunu doğrudan etkiler. Böylece boş uzay ortamı için tasarlanmış anten kayıplı doku ortamında farklı bir çalışma frekansına sahip olur veya çalışmaz. Doku dielektrik özellikleri sıcaklık ve frekansla değişir. Doku içi anten uygulamalarında frekans

artarken doku dielektrik sabiti azalır ve iletkenlik artar (Barnes & Greenebaum, 2006).



Şekil 4. Doku içi uygulamalar için önerilen anten geometrisi

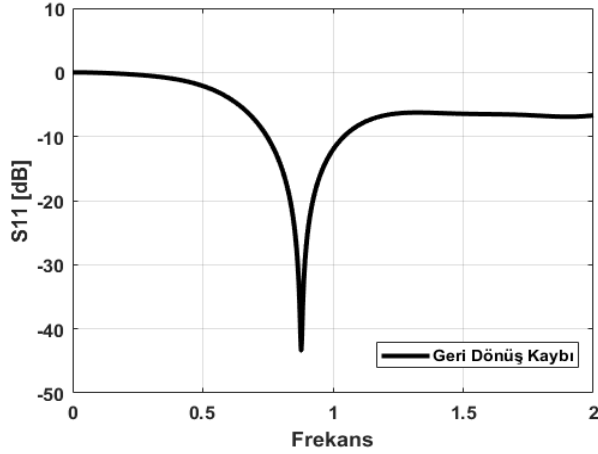
Şekil 4’te doku içi uygulamalar için önerilen anten geometrisi gözükmektedir. Doku içi uygulamalar için anten boyutunun küçültülmesi gerekmektedir. Klasik mikroşerit dipol anteni tamamen simetrik yapıda tasarlayarak H şeklinde katlanmasıyla anten boyutlarından kazanç sağlanmıştır. Tasarlanan antenin uygulanabilirliği de göz önünde bulundurularak ayrı port besleme yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 2. Doku içi uygulamalar için tasarlanan anten uzunluk parametreleri

Uzunluk Parametreleri	Uzunluk Değerleri [mm]
A	7
B	6
C	4
a	2
g	2.6
s	4
w	6.6
t	0.035
T	1.5

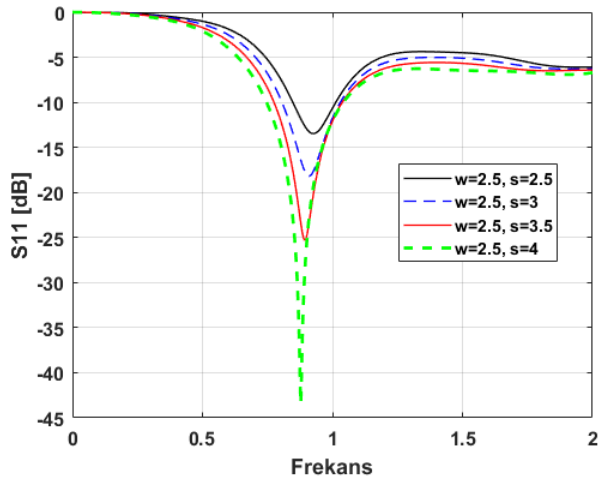
Tablo 2’de tasarlanan antene ait uzunlukları gösteren parametre değişkenleri gözükmektedir.

Tasarlanan antende kalınlığı “ $T$ ” olarak verilen FR4 malzemesinin dielektrik sabiti  $\epsilon_r=4.3$  ve kayıp tanjantı  $\tan\delta_c=0.025$  olarak seçilmiştir. “ $A$ ”, “ $B$ ”, “ $C$ ” gibi değişkenler çalışma frekansının değerini bulmada kullanılırken “ $a$ ”, “ $s$ ”, “ $w$ ” değişkenleri anten empedansı ile ilgilidir. Bu çalışmada 868MHz’de tasarlanan antenin boyutları  $16 \times 15 \times 1.5 \text{ mm}^3$  olarak hesaplanmıştır.

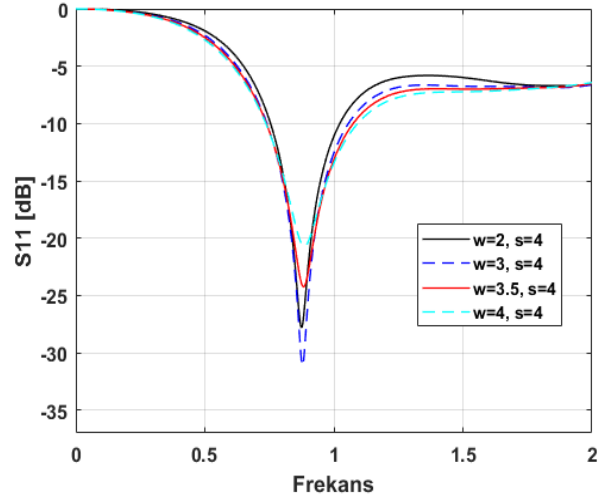


Şekil 5. Doku içinde tasarlanmış H-şeklindeki mikroşerit dipol antene ait  $|S_{11}|$  karakteristiği

Şekil 5'teki geri dönüş grafiğine bakıldığında; tasarlanan antenin 868MHz’de rezonansa gelip, -45 dB geri dönüş kaybına sahip olduğu görülmektedir. Bu frekans bandında, -10 dB sınırına göre bant genişliği yaklaşık 250MHz’dir.

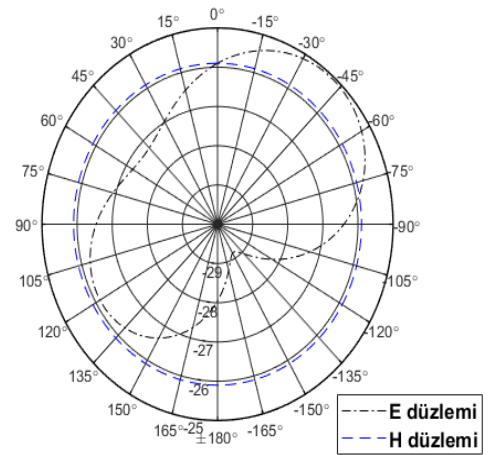


Şekil 6. Uzunluk değişkeni “ $s$ ” değerine bağlı olarak  $|S_{11}|$  karakteristiğindeki değişimin parametrik olarak incelenmesi



Şekil 7. Uzunluk değişkeni “ $w$ ” değerine bağlı olarak  $|S_{11}|$  karakteristiğindeki değişimin parametrik olarak incelenmesi

Şekil 6 ve Şekil 7’de “ $s$ ” ve “ $w$ ” uzunluk parametrelerinin anten geri dönüş kaybına etkisi incelenmiştir. Şekil 6’da “ $w$ ”, 2,5 mm olarak sabit seçilmiş ve “ $s$ ” değerinin farklı durumları incelenmiştir. Şekil 7’de ise “ $s$ ” sabit tutulup “ $w$ ” parametresinin farklı değerleri için sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 6 ve Şekil 7 incelendiğinde “ $s$ ” ve “ $w$ ” parametrelerinin anten performansını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Bu sonuçlara göre  $s=4 \text{ mm}$ ,  $w=7,5 \text{ mm}$  olduğu durumda anten 868MHz’de en iyi geri dönüş kaybı sonucu olan -45 dB değerini vermektedir.



Şekil 8. Doku içi uygulamalar için tasarlanan antenin ışıma örüntüsü kazanç grafiği

Şekil 8.'de doku içi uygulama için tasarlanan H-şeklindeki mikroşerit dipol antene ait E-düzlemi ve H- düzlemini gösteren ışınma örüntüsü kazanç grafiği gösterilmektedir. Bu grafiğe göre maksimum kazanç -25 dB olarak ölçülmüştür.

Tasarlanan antenin doku için uyumlu olup olmadığını anlayabilmek için özgül soğurma oranı (Specific Absorption Rate, SAR) değerinin hesaplanması gerekmektedir. SAR olarak bilinen özgül soğurma oranı kütle başına soğurulan elektromanyetik gücü ifade etmektedir ve eşitlik (3)' te gösterilen bağıntı ile hesaplanabilmektedir (A. K. Doğan, Celep, & Ogan, 2014).

$$SAR = \frac{\sigma \times E^2}{\rho} \quad (3)$$

Burada ;

- $\sigma$  = Elektriksel iletkenlik (S/m)
- $E$  = Elektrik Alan (V/m)
- $\rho$  = Doku yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ) ifade eder.

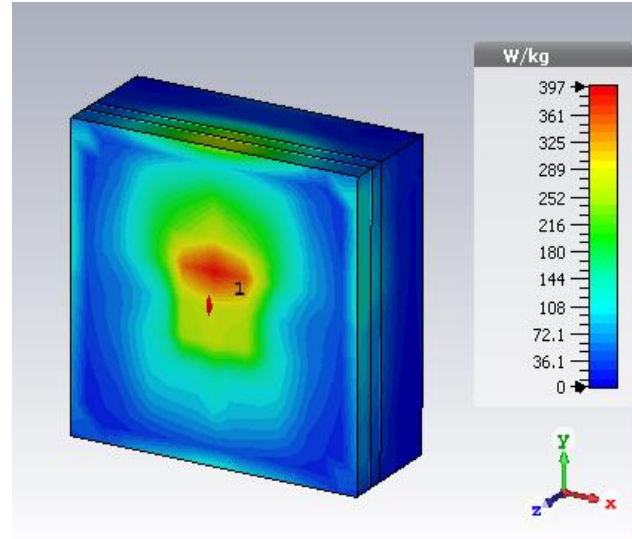
SAR ölçümlerinin sınır değerleri, Amerika Birleşik Devletleri için IEEE C95.1 standardı ile belirlenmiştir (Ahlbom et al., 1998). Örneğin, IEEE C95.1-1999 standardı, bir küp şeklindeki 1 gr'lık doku üzerinde ortalama SAR değerini 1,6 W / kg'dan daha azına sınırlar (Kiourti & Nikita, 2012b). Geçmiş yıllarda yapılan, implant anten çalışmalarının ve bu çalışmaya ait SAR dağılımları (1gr doku için 1watt giriş gücünde W/kg cinsinden) Tablo 3'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Geçmiş yıllarda yapılmış ve mevcut çalışmanın SAR dağılımları karşılaştırması

Kaynak	SAR <sub>1gr,maks</sub> [W/kg]
(J. Kim & Rahmat-Samii, 2004)	182
(Huang & Kishk, 2011)	274
(W.-C. Liu, Chen, & Wu, 2008)	716
(Kiourti, Tsakalakis, & Nikita, 2011)	828,3
Mevcut Çalışma	396,8

Tablo 3'de 1watt giriş gücünde, 1gr doku üzerindeki maksimum SAR dağılımı mevcut çalışma ve eski çalışmalarla karşılaştırılmaktadır.

Tasarlanan antenin SAR dağılımının CST simülasyon programı ile 1 watt giriş gücü verilerek elde edilen 3 boyutlu görüntüsü ve SAR değerleri Şekil 9' da gösterilmiştir.



**Şekil 9.** 868 MHz merkez frekansında tasarlanan implant antenin SAR dağılımı.

Şekil 9.'da ki SAR dağılımına bakıldığında en yüksek SAR değerinin 397 civarında olduğu gözükmektedir. Bu değer Tablo 3. Gösterilen eski çalışmalarla karşılaştırıldığında ortalama bir değer olarak kabul edilebilir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında doku içerisine yerleştirilebilen H-şeklinde katlanmış mikroşerit dipol anten tasarımı ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Boş uzay ortamına göre bir dipol antenin doku içerisine girdiğinde doku dielektrik özelliklerinin antenin boyutlarına etkisi gözlemlenmiştir. Doku içinde tasarlanan antenlerin çalışma frekansının ayarlanabilmesi için doku dielektrik sabiti, doku iletkenliği, antenin doku ortamındaki konumu gibi birçok parametreyi göz önünde bulundurmak gerektiği anlaşılmıştır. Tablo 4 literatürde bulunan mevcut uygulamalar ile bu çalışmanın anten türü, antenin kapladığı alan, anten rezonans frekansı, anten kazancı ve bant genişliği açısından karşılaştırmasını sunmaktadır

**Tablo 4.** Eski çalışmalar ile yapılan çalışmanın karşılaştırılması

ÇALIŞMA	Anten Türü	Alan [mm <sup>2</sup> ]	Frekans [MHz]	Kazanç	Bant Genişliği [MHz]
(Kiourti & Nikita, 2012a)	PIFA	-	868	-35	38
(Lee, Yo, Huang, & Luo, 2009)	PIFA	416	380 440	-27	132
(Francesco Merli et al., 2011)	PIFA	320	404 2450	-18	100
(Kiourti & Nikita, 2012a)	PIFA	203,6	868	-22,35	27
(Lodato & Marrocco, 2016)	Dipol	520	868	-33	-
Mevcut Çalışma	Dipol	240	868	-25	250

Tasarlanan anten boyutları 16×15×1.5 mm<sup>3</sup> boyutlarında tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre 868MHz merkez frekansına sahip bu anten geri dönüş kaybı -10 dB sınırında 250MHz'lik bant genişliği sunmaktadır. Ayrıca ışına örüntüsü simülasyonundan aldığımız verilere göre anten kazancı -25 dB olarak hesaplanmıştır.

Son olarak besleme noktalarının hemen altında bulunan ve bükülmüş iki kolu birbirine kısa devre yapan şerit yapının genişliğini gösteren, "s" ve "w" ile ifade edilen yarık, empedans uyumlandırmada ve iyileştirilmiş geri dönüş kaybında ayar olarak kullanılabilmesi parametrik olarak yapılan simülasyon ile anlaşılmıştır.

## Kaynaklar

- Ahlbom, A., Bergqvist, U., Bernhardt, J., Cesarini, J., Grandolfo, M., Hietanen, M., Stolwijk, J. A. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health physics*, 74(4), 494-521.
- Balanis, C. A. (1992). Antenna theory: A review. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 7-23.
- Barnes, F. S., & Greenebaum, B. (2006). *Biological and medical aspects of electromagnetic fields*: CRC press.
- Bashirullah, R. (2010). Wireless implants. *IEEE microwave magazine*, 11(7), S14-S23.
- BTK, Bilgi Teknolojileri ve İletişimi Kurumu, Milli Frekans Planı ve Diğer Planlar. Retrieved

28.02.2016, from <https://ifis.btk.gov.tr/wmfys/millifrekansorgu.aspx>

- Cheng, T.-Y., & Herman, C. (2011). *Optimization of skin cooling for thermographic imaging of near-surface lesions*. Paper presented at the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Çelik, A. R., Kurt, M. B., & Helhel, S. (2016). *Design an Ultra-Wide Band Antenna for Microwave Imaging Systems*. Paper presented at the International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16) Konya/TURKEY.
- Çelik, A. R., Kurt, M. B., & Helhel, S. (2018). Mikrodalga görüntüleme uygulamaları için bir düzlemsel dikdörtgen monopol anten tasarımı ve optimizasyonu. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1), 1-12.
- Doddipalli, S., Kothari, A., & Peshwe, P. (2017). A Low Profile Ultrawide Band Monopole Antenna for Wearable Applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017.
- Doğan, A. K., Celep, M., & Ogan, S. (2014). Sar ölçümlerinde kullanılmak üzere dipol anten yapımı ve karakterizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(8), 310-313.
- Doğan, H., Çağlar, M. F., Yavuz, M., & Gözel, M. A. (2016). Hayvan İzlemede Radyo Frekanslı Tanımlama Sistemlerinin Kullanımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 8(2), 38-53.
- Gözel, M. A., & Çağlar, M. F. (2016). *RFID Tag Antenna Design in Different ISM Bands for Implant Identification*. Paper presented at



- the International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'16) Konya/TURKEY.
- Gözel, M. A., Çağlar, M. F., & Doğan, H. (2016). İmplant Tanımlama için Katlanmış Dipollü RFID Etiket Anteni Tasarımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(3), 579-586.
- Houzen, T., Takahashi, M., Saito, K., & Ito, K. (2008). *Implanted planar inverted F-antenna for cardiac pacemaker system*. Paper presented at the Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials, 2008. iWAT 2008. International Workshop on.
- Huang, W., & Kishk, A. A. (2011). Embedded spiral microstrip implantable antenna. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2011.
- Institute of Applied Physics. from <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/htmlclie/htmlclie.php>
- Kang, C.-H., Wu, S.-J., & Tarng, J.-H. (2012). A novel folded UWB antenna for wireless body area network. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 60(2), 1139-1142.
- Karacolak, T., Hood, A. Z., & Topsakal, E. (2008). Design of a dual-band implantable antenna and development of skin mimicking gels for continuous glucose monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 56(4), 1001-1008.
- Kim, J., & Rahmat-Samii, Y. (2004). Implanted antennas inside a human body: Simulations, designs, and characterizations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(8), 1934-1943.
- Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M. (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.
- Kiourti, A., Christopoulou, M., Koulouridis, S., & Nikita, K. S. (2010). *Design of a novel miniaturized implantable PIFA for biomedical telemetry*. Paper presented at the International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare.
- Kiourti, A., & Nikita, K. S. (2012a). Miniature scalp-implantable antennas for telemetry in the MICS and ISM bands: design, safety considerations and link budget analysis. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 60(8), 3568-3575.
- Kiourti, A., & Nikita, K. S. (2012b). A review of implantable patch antennas for biomedical telemetry: Challenges and solutions [wireless corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(3), 210-228.
- Kiourti, A., Tsakalakis, M., & Nikita, K. S. (2011). *Parametric study and design of implantable PIFAs for wireless biotelemetry*. Paper presented at the International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare.
- Lee, C. M., Yo, T. C., Huang, F. J., & Luo, C. H. (2009). Bandwidth enhancement of planar inverted-F antenna for implantable biotelemetry. *Microwave and Optical Technology Letters*, 51(3), 749-752.
- Liu, W.-C., Chen, S.-H., & Wu, C.-M. (2008). Implantable broadband circular stacked PIFA antenna for biotelemetry communication. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 22(13), 1791-1800.
- Liu, X., Stachel, J. R., Sejdic, E., Mickle, M. H., & Berger, J. L. (2013). *The UHF Gen 2 RFID System for transcutaneous operation for orthopedic implants*. Paper presented at the Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International.
- Lodato, R., & Marrocco, G. (2016). Close Integration of a UHF-RFID transponder into a limb prosthesis for tracking and sensing. *IEEE Sensors Journal*, 16(6), 1806-1813.
- Merli, F., Bolomey, L., Meurville, E., & Skrivervik, A. (2008). *Implanted antenna for biomedical applications*. Paper presented at the Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008. AP-S 2008. IEEE.
- Merli, F., Bolomey, L., Zürcher, J.-F., Corradini, G., Meurville, E., & Skrivervik, A. K. (2011). Design, realization and measurements of a miniature antenna for implantable wireless communication systems. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 59(10), 3544-3555.
- Panescu, D. (2008). Emerging technologies [wireless communication systems for implantable medical devices]. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 27(2).

- Polk, C., & Postow, E. (1995). *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields, -2 Volume Set*: CRC press.
- Rosen, A., Stuchly, M. A., & Vander Vorst, A. (2002). Applications of RF/microwaves in medicine. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 963-974.
- Soontornpipit, P., Furse, C. M., & Chung, Y. C. (2004). Design of implantable microstrip antenna for communication with medical implants. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52(8), 1944-1951.
- Wessapan, T., & Rattanadecho, P. (2018). Temperature induced in human organs due to near-field and far-field electromagnetic exposure effects. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 65-76.
- Xue, R.-F., Cheng, K.-W., & Je, M. (2013). High-efficiency wireless power transfer for biomedical implants by optimal resonant load transformation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(4), 867-874.
- Yang, G.-Z., & Yang, G. (2006). *Body sensor networks* (Vol. 1): Springer.

## H-shaped implantable microstrip dipole antenna design at 868 MHz UHF band

### Extended abstract

Implant antenna applications are living subject for biomedical engineering in recent years. Thanks to body-implantable devices, many innovations and treatment approaches show up day by day. As a result, new areas of work are emerging.

In this study, we propose new antenna design in implantable biomedical applications. The antenna built in 3D electromagnetic simulation program which uses Finite Element Method. The simulation consist of H shaped folded dipole antenna and biological tissue medium. The tissue media contains three different layers which are muscle ( $31 \times 30 \times 8 \text{ mm}^3$ ), fat ( $31 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$ ) and skin ( $31 \times 30 \times 2.1 \text{ mm}^3$ ). Implanting region of antenna restricted in skin and fat.

In this work, designed antenna frequency is 868 MHz. The substrate of the antenna is selected FR4 which is commonly used in electronic devices. And the shapes of antenna defined as  $16 \times 15 \times 1.5 \text{ mm}^3$  volume.

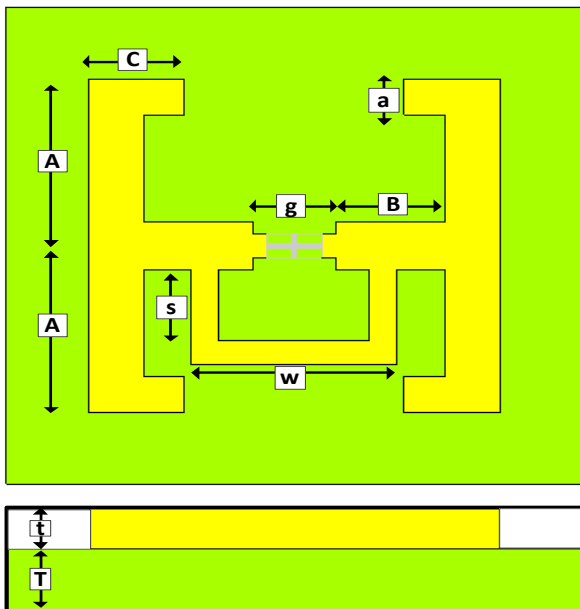


Figure 4. The antenna geometry that is recommended for intra-tissue applications.

The antenna design is shown in figure 4. H-shaped folded microstrip dipole antenna designs and simulations were carried out in this study. Thus, when a dipole antenna enters the tissue according to the free space environment, the effect of the tissue dielectric properties on the antenna dimensions is observed. It has been understood that many parameters such as tissue dielectric constant, tissue conductivity, antenna location in tissue environment must be taken into consideration in order to adjust the working frequency of antennas designed in tissue.

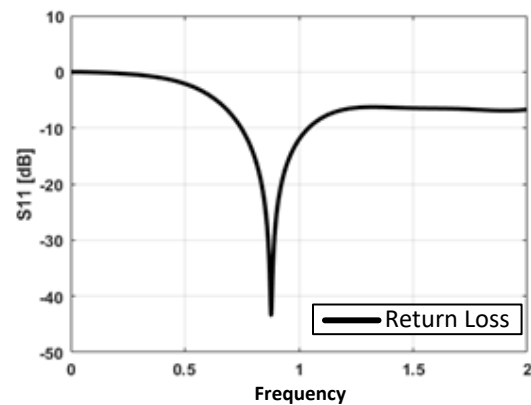


Figure 5. The characteristic of  $|S_{11}|$  that has been designed for intra-tissue applications.

Figure 5 shows that the characteristic of return loss for H-shape antenna. According to the simulation results, this antenna with a center frequency of 868MHz offers a bandwidth of 250MHz with a return loss of -10 dB. In addition, we calculated the antenna gain to be -25 dB according to the information obtained from the simulation of the radiation pattern.

Finally, the slit, denoted by "s" and "w", which shows the width of the stripe structure, that is directly underneath the feed points and is shorted to each other, is understood by parametric simulation which can be used as impedance adjustment and improved return loss adjustment.

This proposed antenna dimensions are smaller than many previous works.

**Keywords:** Implantable Antenna, H-shape Microstrip dipole antenna, Intra-tissue antenna design, SAR (Specific Absorption Rate)



# Frekans Seçici Yüzey Analizi Yöntemiyle Gerçekleştirilmiş 1.35 GHz Frekanslı Bant Durduran Süzgeç Tasarımı

**Mehmet DUMAN**

Düzce Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce  
[mehmetduman@duzce.edu.tr](mailto:mehmetduman@duzce.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0831-0172, Tel: 0380 5421133

Geliş: 08.10.2018, Revizyon: 12.03.2018, Kabul Tarihi: 21.12.2018

## Öz

Elektromanyetik cihazların ve geliştirilen diğer elektronik aygıtların bilişim ve elektronik sektöründe son yıllarda sağladığı kolaylık ile birlikte insan sağlığına olumsuz etkileri de bulunmaktadır. Bu çalışmada, elektriksel sistemlerden kaynaklanan istenmeyen etkileri, seçilen frekans aralıklarında engellemek veya azaltmak için frekans seçici yüzey analizi yardımıyla oluşturulan bant durdurucu süzgeç tasarımı anlatılmaktadır. 1.35 GHz merkez frekansında çalışan ve 44 MHz bant genişliğine sahip olan süzgeç, kompozit epoksi plakaların iç kısmında yapılan bir takım değişiklikler ile herhangi bir aktif ya da pasif devre elemanı kullanılmaksızın sadece plaka ile süzgeç işlevini gerçekleştirmektedir. Gerçekleştirilen süzgecin boyutları ayarlanarak cep telefonu, bilgisayar, modem, vb. gibi yayılım yapan ve yan etkileri bulunan cihazların, 1.35 GHz merkez frekansı civarlarında olumsuz etkilerinden kurtulmak mümkündür. Aynı şekilde, yayılım yapan elektronik cihazın, tasarlanan süzgecin bant genişliği boyunca, diğer elektronik aygıtlar ile yapacağı girişim de engellenmiş olacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Bant durdurucu süzgeç; Elektromanyetik radyasyon; Frekans seçici yüzey analizi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.468164

## Giriş

Frekans seçici yüzey (FSY) tasarımları transistör gibi aktif; kapasitör, indüktör, direnç gibi pasif devre elemanı kullanmaksızın sadece metal/ametal plakalar kullanılarak gerçekleştirilen tasarımlardır (Munk, 2000). Bu sayede maliyet önemli ölçüde azalırken; süreç işlemleri de kısalmaktadır. Ayrıca diğer elektromanyetik dalgalar ile olan girişimler FSY yapıları sayesinde engellenebilmektedir (Sung, 2006).

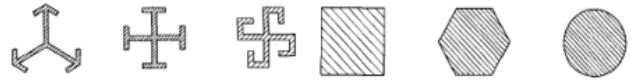
FSY tasarlanırken çoğunlukla kompozit yapıda epoksi malzemeler kullanılır, ilgili tasarımda da baskı devre benzetimi için benzer malzeme (FR4 tipi plaka) kullanılmıştır. Plakanın içi Şekil 1’de verilen formlarda veya bu formların karışımını içerecek biçimde kesilebilir. Plakanın içindeki boşluklar, Şekil 1.’deki modellerden olabileceği gibi boşluk harici kısımlar da aynı modellerden olabilir. Epoksi malzeme ve boşlukların birbirinin yerine geçmesiyle; bant geçiren süzgeç, bant durduran süzgece dönüşebilir (Wu, 1995).

Literatürde; (Mudar vd., 2009) birim hücre kullanarak 2. dereceden bant geçiren filtre cevabının elde edilmesini, (Çimen, 2012) düzlemsel çift bant tasarımını, (Bayraktar vd., 2015) kablosuz yerel alan ağı frekansları için bant durduran filtre yapısını, (Bodur vd., 2018) birim hücre metodu ile ultra geniş bantlı uygulamalar için çift katmanlı FSY yapısını, (Ünaldı vd., 2014) yüksek seçici özellikli tek katmanlı FSY yapısını, (Delihalıcıoğlu vd., 2014) U şeklindeki yapıların kullanılmasıyla bant durduran filtre elde edilmesini gerçekleştirmiştir.

İstenilen bant genişliği, merkez frekans, kazanç ve yansıma değerleri elde edilene kadar çeşitli denemeler, teorik çalışmalar (Balanis, 2013) yardımıyla elde edilen hesaplamalara göre CST Studio Suite Bilgisayar Programı’nda yapılır.

Bu çalışmada; boyutu artan çeyrek çemberlerin birleşimi ile literatürdeki yapılardan farklı olan

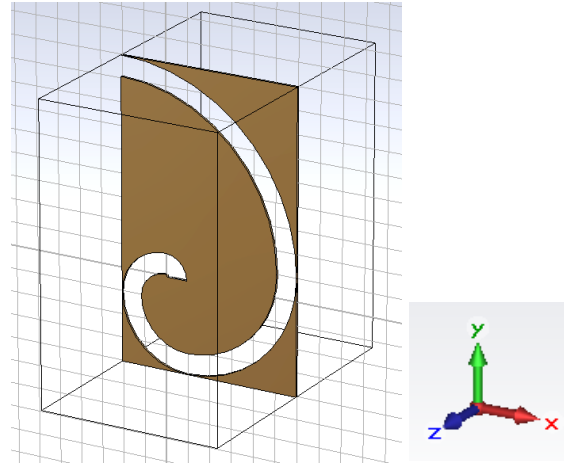
bir tasarım sunulmuş ve 1.35 GHz frekansında çalışabilecek bir bant durduran süzgeç yapısı elde edilmiştir (Duman vd., 2016).



Şekil 1. FSY Formları

## Bant Durduran Süzgeç Boyutları ve Yapısı

5 adet çeyrek çemberin uç kısımlarından birbirine eklenmesi ile Şekil 2.’deki tasarım oluşturulmuştur. Bu tasarımda, çeyrek çemberler birleştirilmiş ve  $80 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  boyutlarında ve  $1 \text{ mm}$  kalınlığındaki epoksi malzemeden (FR4) çıkartılmıştır.



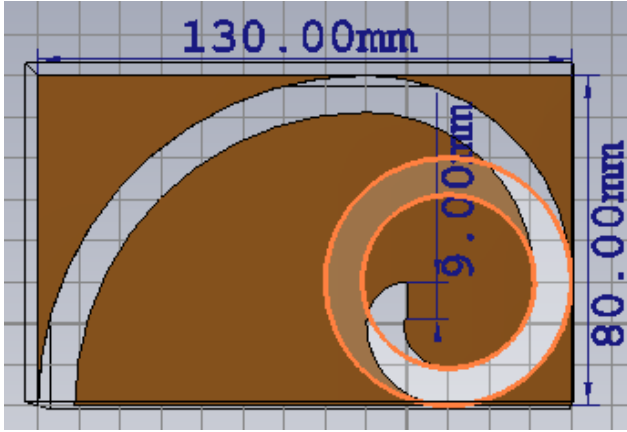
Şekil 2. Özgün Süzgeç Tasarımı

## Boyutlar

FR4 içinde  $9 \text{ mm}$  genişliğinde boşluklar oluşturulmuştur. Şekil 3.’te tasarım boyutlarının daha iyi kavranması için 3. çember gösterilmiştir. Çemberin dörtte birlik kısmı, başka bir ifadeyle, boşluklar ile çakışan kısmı FR4’ten kesilmiştir. Aynı işlem Tablo 1’de boyutları verilen diğer 4 çember için de gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. FSY Tasarımındaki Çemberlerin Boyutları

	İç Yarıçap [mm]	Dış Yarıçap [mm]
1. Çeyrek Çember	1	10
2. Çeyrek Çember	11	20
3. Çeyrek Çember	21	30
4. Çeyrek Çember	41	50
5. Çeyrek Çember	71	80

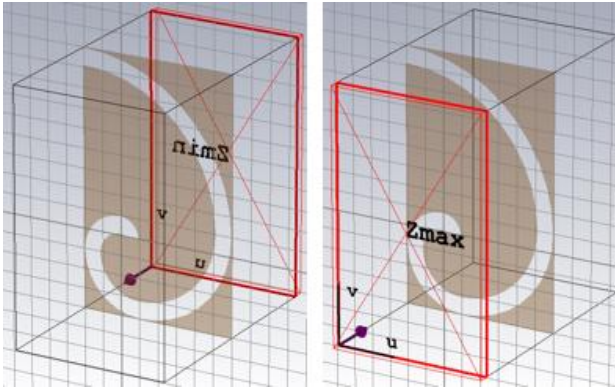


Şekil 3. Süzgeçteki Boyutlar

Bant durdurucu süzgeç tasarlamak için keskin bir merkez frekans olması tavsiye edilir. Yeteri kadar bant genişliği elde edilmeli ve istenen frekans aralığı yakalanmalıdır.

İç yarıçap ve dış yarıçap arasındaki 9 mm genişlik ve plaka kalınlığı (1 mm) istenilen çıktılara göre düzenlenmiş ve son halini almıştır.

#### Yapı



Şekil 4. Zmin ve Zmax Portları

Benzetimler bilgisayar ortamında CST Studio Suite Programı kullanılarak oluşturulmuştur. Malzeme olarak ideal plaka düşüncesiyle

“Copper (optical)” seçilmiştir. Zmin ve Zmax portlarının referans noktasına göre yerleşim yerleri Şekil 4.’te verilmiştir.

#### Benzetim Sonuçları

Tasarımın benzetimleri frekans ekseninde yapılmıştır. İlgili boyut ve yapılar hazırlandıktan sonra 700 MHz ile 1700 MHz arasında S Parametreleri için grafikler elde edilmiştir. Alınan grafiklerde dB ekseninde genliği en çok düşüren frekans değeri 1355 MHz değeri olarak ölçülmüştür.

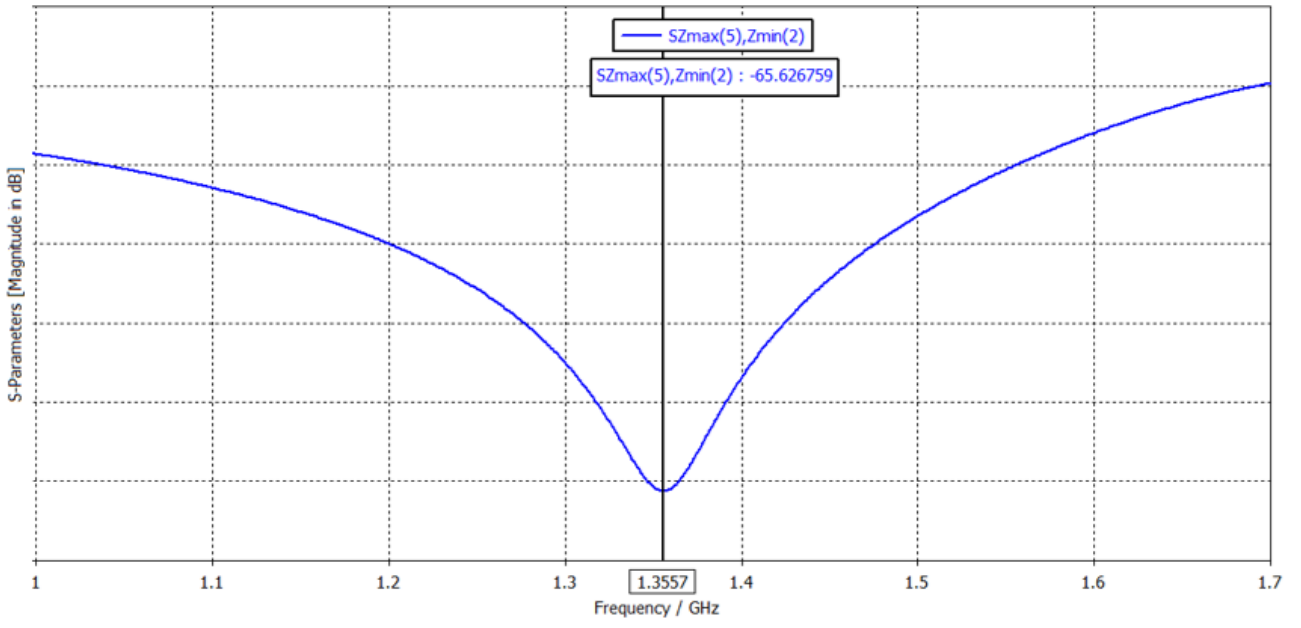
Merkez frekans değeri hesaplanırken 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz ve 2600 MHz frekans değerlerine gelmemesine telefon şirketlerinin kullandığı özel frekans değerleri olduğu için dikkat edilmiştir.

Amaç sadece 2600 MHz ile iletişim kurmak ise FSY analizi bu isteğe göre şekil alabilir. Sadece 4.5 G üzerinden iletişim kurulmak istenirse diğer frekanslar donanımsal olarak bloke edilir ve istenmeyen frekanslarda elektromanyetik dalganın yayılımı olmayacağı için telefon bataryasında da önemli ölçüde tasarruf sağlanacaktır.

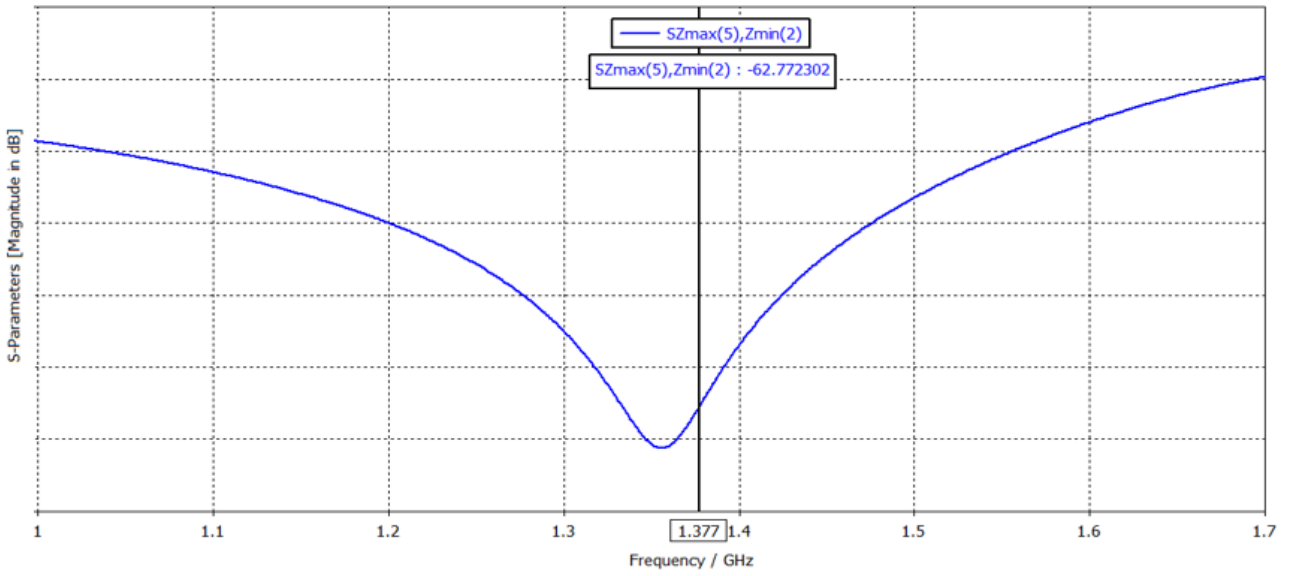
Şekil 5.’te S parametrelerinden  $[SZ_{max}, Z_{min}] (S_{21})$  değeri grafik üzerinde gösterilmiştir.

1355.7 MHz olan merkez frekans değerinin 3 dB yükseldiği frekans değeri 1377 MHz değeri olarak ölçülmüş ve Şekil 6.’da gösterilmiştir. Bant genişliği hesabı bu 3 dB’lik yükseliş sayesinde yapılır.

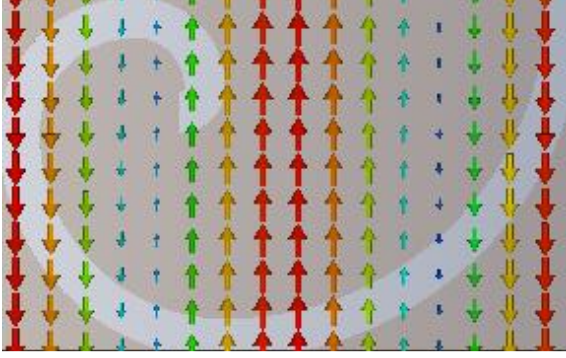
Elektrik alan ve manyetik alan dağılımının gösterimleri Şekil 7. ve Şekil 8.’de verilmiştir.



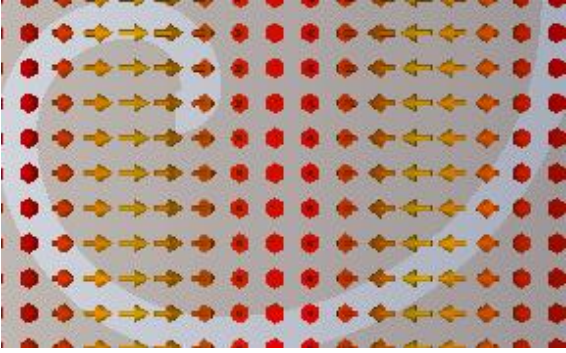
Şekil 5.  $S_{21}$  ve Merkez Frekans Grafiği



Şekil 6. Bant Genişliği Grafiği



Şekil 7. Elektrik Alan Dağılımı Gösterimi



Şekil 8. Manyetik Alan Dağılımı Gösterimi

## Sonuçlar ve Tartışma

Mühendisliğin temel görevlerinden biri maliyeti düşürmektir. Bu çalışmada, az maliyetli bir bant durdurucu tasarımını aktarılmıştır. Sadece  $80 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  boyutlarında kompozit epoksi plaka ve bu plaka üzerinde gerçekleştirilen bir takım geometrik değişikliklerden sonra  $1355.7 \text{ MHz}$  merkez frekansında ve  $44 \text{ MHz}$  bant genişliğinde akıllı sistemlerde ve elektronik cihazlarda cihazlarda

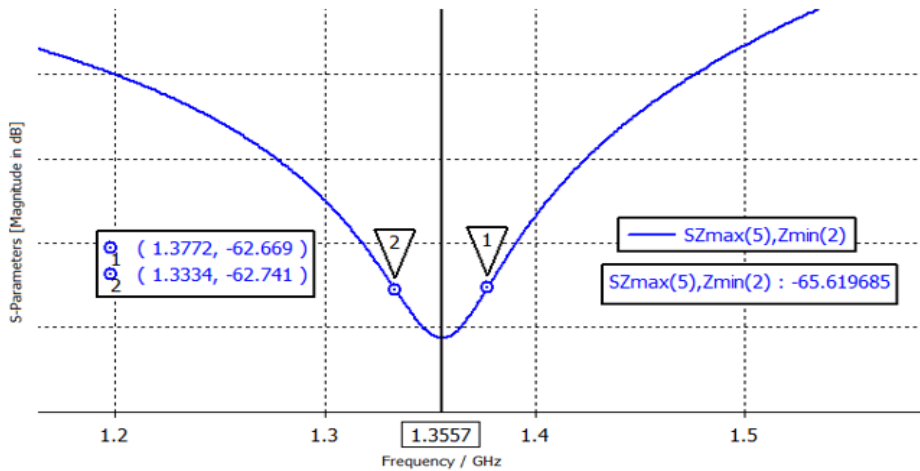
kullanılabilecek bir bant durdurucu süzgeç tasarımı yapılmıştır.

Plakada bulunan şekillerin değiştirilmesiyle istenilen frekanslarda çalışma sağlanabilir. Süzgeç sayesinde istenmeyen frekanslardaki dalga yayılmaları iki yönde de azaltılabilir ya da durdurulabilir. İlgili tasarımda,  $S_{21}$  değeri çalışma frekansında  $-65.6 \text{ dB}$  değerlerine kadar gelmektedir. Şekil 9.'da grafiksel olarak detaylı bir gösterim verilmiştir.

Akıllı cep telefonlarındaki yasa dışı dinleme durumları da benzeri tasarımlar yardımıyla engellenebilir. Değişken merkez frekanslı bir tasarım sayesinde  $1800 \text{ MHz}$ 'de iletişim sağlanabiliyorken  $2100 \text{ MHz}$ 'e atlama olduğunda verici istasyon ile bağlantı hızlı bir şekilde kurulurken; dinleme yapan cihazın çalışma frekansını bulması vakit alabilecektir.

Koaksiyel kablodan dalga kılavuzuna dönüştürücü gibi ara elemanlar sayesinde aktif devrelere bağlantısı yapılabilen yeni tasarımlar ile bant durdurucu süzgecin kullanım alanları artmış olacaktır.

Tasarımın tümleyeni alınarak, epoksi plaka olan kısımlar boşluk, boşluk olan kısımlar epoksi plaka olduğunda; bant durdurucu süzgeç yerine bant geçiren süzgeç gibi davranacak olan yeni süzgeç, elektromanyetik anabilim dalının birçok yerinde kullanılabilecektir.



Şekil 9. Çalışma Frekansları



Tasarlanan bant durduran süzgeç, RF güç kuvvetlendirici devrelerde, mikroşerit anten tasarımlarında, dalga kılavuzu yapılarında, düşük güçlü güç kuvvetlendirici, osilatör, mikser gibi aktif sistemlerde kullanım alanı bulabilecektir.

## Bilgi ve Teşekkür

Bu çalışmanın ilk hali daha önceden 29 Eylül – 1 Ekim 2016 tarihleri arasında Düzce Üniversitesi'nde gerçekleştirilen Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları (ASYU) Konferansı'nda sözlü olarak sunulmuş ve tam metin olarak bildiri kitabında basılmıştır.

Yazar, desteklerinden dolayı Düzce Üniversitesi'ne, Kocaeli Üniversitesi'ne ve TÜBİTAK-BİDEB'e teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Balanis, C. A., (2013), "Anten Teorisi Analiz ve Tasarım", 3. Baskı Nobel Yayınları, Wiley.
- Bayraktar, İ. M., Akçam, N., Yardım, F. E., (2015), "WLAN Kanalları İçin Bant Durduran Frekans Seçici Yüzey Tasarımı", International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), Valensiya, İspanya.
- Bodur, H., Çimen, S., (2018), "Ultra Geniş Bant Uygulamalar için Çift Katmanlı FSY Tasarımı", International Multidisciplinary Congress of Eurasia (IMCOFE), Barselona, İspanya.
- Cheng, D.K., "Field and Wave Electromagnetics", 2nd Edition, Syracuse University, Addison-Wesley Publishing Company.
- Cripps, S.C., (1999), "RF Power Amplifiers for Wireless Communications", Artech House, Boston.
- Çimen, S., (2012), "Design of Planar Dual Band Frequency Selective Surface", 12. Uluslararası Akdeniz Mikrodalga Sempozyumu.
- Delihacıoğlu, K., vd., (2014), "U-Şekilli Frekans Seçici Yüzeylerle Band Durduran Filtre Tasarımı", Uluslararası Radyo Bilimleri Birliği (URSI) VII. Bilimsel Kongresi, Elazığ, Türkiye.
- Duman, M., (2016), "Designing metal band pass filter plate with the Golden Ratio Rule and effect of Golden Ratio Rule to the filter", 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, Turkey.
- Duman, M., Güney Duman, M., Güney, T., (2016), "Akıllı Sistemler için Frekans Seçici Yüzey

- Analizi ile Oluşturulmuş Bant Durduran Filtre Tasarımı", Akıllı Sistemlerde Yenilikler Ve Uygulamaları ASYU Konferansı, Düzce, Türkiye.
- Mudar, A.J., Nader B., (2009), "A New Technique for Design of Low-Profile, Second-Order, Bandpass Frequency Selective Surfaces", IEEE Transactions on Antennas And Propagation, Vol. 57, No. 2, February.
- Munk, B. A., (2000), "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", Wiley, New York.
- Pozar, D. M., (1998), "Microwave Engineering", John Wiley&Sons, Inc..
- Sung, H.H., (2006), "Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference" PhD Thesis, The University of Auckland.
- Ünalı, S., Çakır, G., Çimen, S., Ayten, U. E., (2014), "İnce Tabakalı Dar-Dual Bant Frekans Seçici Yüzey Tasarımı", Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), Bursa, Türkiye.
- Wu T.K., (1995), "Frequency Selective Surface and Grid Array," Wiley, New York.

## **Band Stop Filter Design at 1.35 GHz Frequency with Frequency Selective Surface Analysis**

### **Extended abstract**

*Electromagnetic devices and other developed electronic devices in the information technology and electronics sector have increased in recent years, but these devices have a negative impact on human health.*

*In this study, the band stop filter design which is generated by frequency selective surface (FSS) analysis to prevent or reduce the unwanted effects caused by electrical systems in selected frequency ranges is explained.*

*The filter, which operates at 1.35 GHz central frequency and has a bandwidth of 44 MHz, has been formed by a number of modifications made in the interior of the composite epoxy plates. No active or passive circuit elements have been used. Only the processed epoxy plate provides the filter function. By adjusting the dimensions of the designed filter, it is possible to get rid of the negative effects of the devices which are spreading and have side effects such as mobile phones, computers, modems, etc. around the 1.35 GHz central frequency.*

*Likewise, the interference of the electronic device with the other electronic devices along the bandwidth of the designed screen will also be prevented.*

*While the design was made, circles with 5 different diameters were used. The quarter of each circle was taken and added to the tip. The formed shape was removed from the epoxy plate. By varying the thickness of the epoxy plate, the diameters of the circles and the forms of merge, etc., different center frequencies and band widths can be obtained. In designs made with the CST Program, band pass filter can be obtained if epoxy plate and cavities complements are taken.*

*When calculating the central frequency, attention was paid to the frequency values of 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz and 2600 MHz, since these specific frequency values were used by telephone companies. On the other hand, if only 2600 MHz frequency is desired to be communicated, the FSS analysis can be arranged according to this request. If*

*only 4.5 G communication is desired, other frequencies are blocked in hardware.*

*Since there is no electromagnetic wave propagation at unwanted frequencies, significant savings will be achieved in the phone battery.*

*One of the main tasks of engineering is to reduce costs. In this study, a low-cost band stop filter design is described. This filter can be used in smart systems and electronic devices.*

*Illegal listening situations in smart mobile phones can also be eliminated with similar designs. Thanks to a variable center frequency design, while communicating at 1800 MHz, the connection to the transmitter station is quickly established when jumping to 2100 MHz; it may take time for the listening device to find the operating frequency.*

*Through the use of intermediate elements such as converters from coaxial cable to waveguide, new designs that can be connected to active circuits will increase the usage areas of the band stopper filter.*

*If the usage areas are increased, the effect of electromagnetic waves which have a negative effect on human health decreases, this study will be successful.*

**Keywords:** *Band stop filter; Electromagnetic radiation; Frequency selective surface analysis*



## İmge Şifreleme Yöntem ve Algoritmaları

**Nur Sena ATALAY\***

Fırat Üniversitesi, Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
nursena.atalay@gmail.com ORCID: 0000-0003-2053-7393, Tel: (424) 237 00 00

**Şengül DOĞAN, Türker TUNCER, Erhan AKBAL**

Fırat Üniversitesi, Adli Bilişim Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
sdogan@firat.edu.tr , turkertuncer@firat.edu.tr , erhanakbal@firat.edu.tr ORCID: orcid.org/0000-0001-9677-5684,  
orcid.org/0000-0002-1425-4664, orcid.org/0000-0001-9677-5684

Geliş: 05.11.2018, Revizyon: 05.04.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

### Öz

Teknolojinin gelişimine bağlı olarak, dijital görüntülerin internet üzerinden aktarılması oldukça yaygınlaşmıştır. Kişisel verilerin korunması açısından çeşitli kamu ve resmi alanlarda kullanılan dijital görüntülerin internet üzerinden aktarımını sağlarken yüksek derecede verilerin korunmasını, veri bütünlüğünün ve gizliliğinin sağlanması gerekmektedir. Dijital görüntülerin aktarımının güvenliği ve gizliliğinin sağlanması, genel olarak çeşitli şifreleme algoritmaları ile anahtarlı ve anahtarsız olarak gerçekleştirilmektedir. Günümüzde, görüntü güvenliği her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir. Bunun nedenlerinin başında, gizli görüntülerin kamuya internet üzerinden aktarılıyor olması ve iki kişi arasında yapılan bu aktarıma üçüncü bir şahsın da erişebiliyor olmasıdır. Bu bağlamda, şifreleme, özel bilgilerin güvenliğini sağlamak için etkili ve doğrudan bir teknik olarak kabul edildiğinden, çeşitli görüntü şifreleme sistemleri önerilmiştir. Mimarilere göre, şifrelemeye yönelik yöntemler üç ayrı kategoriye ayrılabilir. Bunlar permütasyon, yer değiştirme, permütasyon ve yer değiştirme olarak kategorize edilmektedir. Bu çalışmada özel bilgilerin güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulan ve yaygın kullanılan bazı imge şifreleme algoritmalarının çalışma yapısı ve mantığı incelendi ve algoritmalar arası performanslar karşılaştırmalı bir şekilde sunuldu. Bu çalışmanın asıl amacı, kişisel bilgilerin güvenliğinin sağlanmasında kullanılan bu imge şifreleme algoritmalarının çalışma yöntemi ve metodolojisini karşılaştırarak, algoritmalar arası farkındalığı ortaya koymaktır.

**Anahtar Kelimeler:** İmge şifreleme, Kişisel verilerin gizliliği, İmge şifreleme yöntem ve metodolojisi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Günümüzde aklımıza gelebilecek her alan internet kullanımı ile gerçekleşmektedir. İnternet alışverişleri, veri aktarımı, iş yerleri, okullar vb. birçok alanda veri alışverişi internet üzerinden yapılmaktadır. İşlemlerin tamamı kişisel bilgiler, kredi kartı numaraları vb. kullanılarak kişisel bilgilerin paylaşılmaması ve güvenliğinin iyi sağlanması gereken olgular ile gerçekleşmektedir. İnternet kullanıcılarının günden güne artan sayısı ile internet üzerinden iletilen her veri, başka bir kişinin kötü niyetli bir şekilde zarar görmesinden dolayı tehdit altındadır. Sistem ağına gönderilen verilere güvenlik sağlamak için ağ güvenliği yetersiz kalmaktadır. Büyüyen teknoloji ile bilgisayar korsanları, teknolojiyi ve onu ele geçirme yollarını her geçen gün biraz daha farklı teknikler ile gerçekleştirmektedir. Güvenliği sağlamak için tek yol, üçüncü şahısların önemli bilgilerin varlığı hakkında bilgi sahibi olmamasını sağlamaktır. Dijital damgalar, görsel kriptografi, steganografi gibi bilginin korunması amacıyla birçok teknik geliştirilmiştir ve bunun yanı sıra araştırmacılar görüntü verisinin korunması ile ilgili birçok farklı teknik geliştirmişlerdir. 20. yüzyılın sonunda, çeşitli alanlardaki belgeler ve ekipmanların artan kullanımından ötürü, analogdan sayısal analize kadar olağanüstü bir teknik devrime damgasını vurmuştur. Bununla birlikte, dijital devrimin avantajları, dijital multimedya belgelerinin yasadışı kopyalanması ve dağıtılması gibi dezavantajlar olmaksızın gerçekleştirilememiştir. Bu zorluğu gidermek için, araştırmacılar multimedya dokümanlarını yeni ve etkili belge koruma teknikleriyle korumak için daha çok teknik geliştirmeye yönelik çalışmışlardır. Bu bağlamda, şifreleme ve dijital damgalama gibi farklı teknikler üretilmiştir. Bunlardan ilki olan algoritmalar, yasal kullanıcılar dışındaki herkes tarafından okunamaz hale getirmek için geliştirilmiştir. İkincisi, dijital multimedya içeriklerinin sahipliğini ve bütünlüğünü garanti altına almak için dijital filigranları multimedya belgelerine yerleştirmekten ibarettir. Özel anahtar şifreleme standartları (DES ve AES) gibi geleneksel görüntü şifreleme algoritmaları, Rivest Shamir Adleman (RSA) gibi kamu anahtar standartları,

eliptik eğri tabanlı şifreleme (ECC) ailesi ve uluslararası veri şifreleme algoritması (IDEA), özellikle hızlı ve gerçek zamanlı iletişim uygulamaları görüntü şifrelemesi için en çok kullanılan algoritmalar arasında yer almaktadır. Kişisel bilgi ve verilerin korunması açısından ve çeşitli özel kamu ve sektör alanlarında kullanılan dijital görüntü ve bilgilerin sanal ortamda aktarımını sağlarken verilerin korunması, veri bütünlüğünün ve gizliliğinin sağlanması gerekmektedir. Son yıllarda, yeni pek çok şifreleme tekniği üzerine çalışılmıştır ve bu şifreleme şemaları, değer dönüşümü, piksel konum permütasyonu, kaotik sistemler, XOR işlemleri gibi farklı kategorilere ayrılmaktadır. Sanal ortamda gerçekleşen bu aktarımda görüntülerin güvenliği ve gizliliğinin sağlanması, genel olarak çeşitli şifreleme algoritmaları ile anahtarlı ve anahtarsız olarak gerçekleşmektedir. Bu çalışmada, sanal ortamda aktarımının sağlandığı dijital görüntülerin gizliliğinin ve bütünlüğünün korunması üzerine kullanılan ulusal ve uluslararası literatür taraması çalışmaları incelenmiştir. Kumari ve arkadaşları tarafından hazırlanan çalışmada, imge şifreleme teknikleri ve bu tekniklerin çalışma mantığı, diferansiyel, istatistiksel ve kantitatif atak analizleri gibi çeşitli performans ölçümleri üzerine bir çalışma sunulmuştur (Kumari vd., 2017). Kumar ve Srivastava tarafından hazırlanan çalışmada, kaotik haritalara dayanan bir dizi görüntü şifreleme algoritması üzerine bir çalışma yapılmıştır (Kumar ve Srivastava, 2014). Parvaz ve Zarebnia çalışmada, kaotik sistemin geliştirilmesi ve analizi üzerine bir çalışma yürütmüştür (Parvaz ve Zarebnia, 2017). Bao ve Zhou tarafından hazırlanan çalışmada, yeni bir görüntü şifreleme sistemi oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları ve güvenlik analizi ile önerilen yöntemin şifreleme performans ölçümlerinin yapıldığı bir çalışma sunulmuştur (Bao ve Zhou, 2015).

Bu çalışmada özel bilgilerin güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulan ve yaygın kullanılan bazı imge şifreleme algoritmalarının çalışma yapısı ve mantığı incelenmiştir. Yapılan çalışma ile ilk olarak imge şifreleme kavramından bahsedilmiş sonraki bölümde imge şifrelemede kullanılan çeşitli algoritma ve

yöntemler açıklanmış ve karşılaştırmaları çeşitli istatistiksel grafikler ile gösterilmiştir. Sonraki bölümlerde görsel şifrelemenin güvenliğinin nasıl sağlandığı ve güvenlik analizi için kullanılan yöntem ve metriklerden bahsedilmiştir.

## İmge Şifreleme

Bilgi toplumlar arasında korunması gereken önemli bir unsurdur. Roma imparatoru Sezar'dan günümüze bilginin korunması için geliştirilen birçok teknikler vardır. Her ne kadar bilginin güvenliğini sağlamak için birçok yol geliştirilmiş olsa da bilginin korunmasında ki en büyük yapı taşı bilginin gizlenmesi olmuştur. Bu bilimin adı kriptoloji olarak adlandırılmıştır. Teknolojinin gelişimine bağlı olarak günümüzde kullanılan iletişim ağları, çeşitli bankamatik işlemleri, cep telefonları, bilgisayar, internet ve hatta ulaşım gibi birçok alanda ağ üzerinden veri paylaşımı ve aktarımı yapılmaktadır. Bunlara bağlı olarak bu verilerin gizliliği, güvenliği ve veri bütünlüğünün sağlanması çeşitli şifreleme algoritması ile yapılmaktadır. Bu şifrelemenin kullanıldığı alanlardan biri de imge şifrelemedir. Kriptografik algoritmalar, verileri şifrelemek veya şifresini çözmek için anahtar olarak adlandırılan bir dizi karakter kullanımı gerektirir. Anahtar ve algoritma akışı yardımıyla şifreleme gerçekleştirilebilir. Şifreli metni, kendi içerisinde tekrar şifreleyebilir ve ardından metni tekrar düz metin haline getirebiliriz. Günümüzde bilgi güvenliği, veri depolama ve aktarımında daha önemli hale gelmektedir. Görüntüler farklı farklı süreçlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, görüntü verilerinin yetkisiz kullanımlardan korunması önemlidir. Görüntü şifreleme, bilgi gizleme alanında önemli bir rol oynar. Bu nedenle, sunucu yöneticileri ve diğerleri dâhil olmak üzere 3. bir şahıs tarafından, internet gibi genel ağlar aracılığıyla orijinal mesaja ya da başka herhangi bir aktarılmış bilgiye erişim sağlayamaz. İmge şifrelemenin çeşitli gereksinimleri bulunmaktadır. Bunlar;

- Orijinal görüntünün piksellerini elde etme yeteneği

- Kolayca saldırıya uğramayacak şekilde güçlü bir şifreleme görüntüsü oluşturma
- Görüntünün şifrelenme süresi
- Şifre çözüldükten sonra resmin orijinalini elde edebilme gibi yeteneklerden oluşmaktadır.

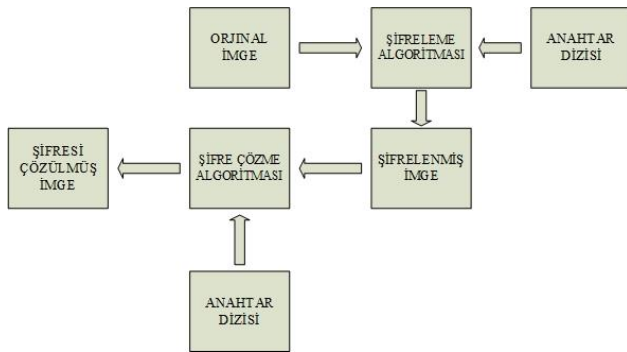
## İmge Şifrelemede Kullanılan Algoritmalar

Görüntülerin güvenliği, günümüzde hala genişleyen dijital aktarım alanındaki önemli yönlerden biridir. Güvenliğin sağlanması için görüntülerin şifrelenmesi en çok kullanılan yöntemlerde biridir. İmge şifrelemede asıl amaç dijital görüntülerin güvenliğini arttırmak ve video, tıbbi görüntüleme sistemleri ve askeri görüntü aktarımları gibi çeşitli uygulamalarda güvenliği üst seviyede gerçekleştirebilmektir. Bu tür dijital aktarımlar saldırılara karşı savunmasızdır ve dolayısıyla güvenli veri aktarımı için etkin şifreleme algoritmaları gereklidir. Bugüne kadar literatürde çeşitli teknikler önerilmiş, (Kumari vd., 2017) her bir teknik giderek artan güvenlik ihtiyacına yetişebilmek için yetersiz kalmıştır. Bu teknikler, diferansiyel, istatistiksel ve kantitatif atak analizleri gibi çeşitli performans ölçütlerine dayanarak oluşturulmuştur. Dünya çapında çeşitli görüntü şifreleme teknikleri önerilmiştir fakat tekniklerin çoğu, diferansiyel ve istatistiksel ataklar dâhil olmak üzere ataklara karşı yetersiz kalmıştır. Aşağıda imge şifrelemede kullanılan algoritmalara birkaç örnek verilmiştir.

## Vigenere Şifreleme Algoritması

Günümüzde yaygın olarak kullanılmayan geri dönüşümü kolay olan bir şifreleme türüdür (Kester, 2012). Kaydırma ve yerine koyma şifrelemesi gibi şifrelemelerden farklı şifrenin her bir harfe uygulanması yerine, her bir harf bloğuna uygulanması ile gerçekleşmektedir. Vigenere şifresi, şifreleme için bir dizi farklı şifrelerden oluşan bir tür poli-alfabetik şifrelemedir. Vigenere tablosu olarak da bilinen şeküler formda bir dizi eleman kullanılmaktadır. Vigenere tablosunda ki ilk satır, n farklı öğeden

oluşur ve kalan tablo, her devam eden öge için n-1 sıraya sahiptir. Aynı zamanda Vigenere şifrelemesinde birden fazla alfabe kullanılmaktadır. Şifreleme için bir anahtar seçilmektedir ve bu anahtara göre her harf farklı bir alfabeyle şifrelenmektedir. Şifre çözme, anahtar elemanına karşılık gelen sıradaki şifreli ögeye bakılarak yapılabilir ve daha sonra sütun, şifresi çözülmüş çıktıyı, yani orijinal harfi temsil edecektir. Geleneksel olarak, Vigenere şifresi, Vigenere tablosunu kullanarak alfabetik metinleri şifrelemek için geliştirilmiştir, ancak son zamanlarda yapılan birçok çalışma, görüntü şifrelemesi için Vigenere'nin şifreleme yöntemini kullanmıştır. Bu teknikler, hem kaotik hem de kaotik olmayan tabanlı olarak kullanılmaktadır. Vigenere imge şifrelemesi için bir giriş görüntüsü alınmaktadır ve ardından Vigenere tablosunu ve anahtarını kullanarak şifreleme işlemi yapılmaktadır. Görüntü piksellerinin tamamı şifrelenene kadar anahtar değeri tekrarlanmaktadır. İmge şifrelemede kullanılan Vigenere algoritması blok diyagramı mantığı aşağıda Şekil 1 ile gösterilmiştir.

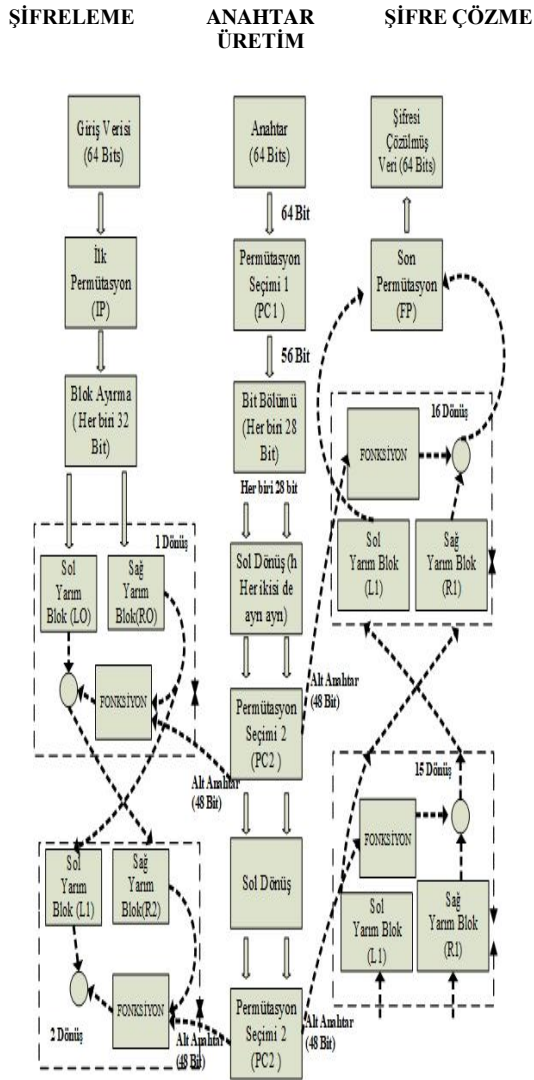


Şekil 1 Vigenere Şifrelemesi Blok Diyagramı

## DES (Data Encryption Standart – Veri Şifreleme Standardı )

Bir çeşit veri şifreleme standardı olan DES, 1970 yıllarında IBM'de geliştirilen ve daha sonra ulusal standartlar bürosu tarafından kabul edilen ve en hızlı blok şifreleme algoritmalarından biri olan şifreleme türüdür (Manjula ve Ravikumar, 2016). Şifrelenecek olan açık metni (Plain Text), parçalara bölerek (Blok) her parçayı birbirinden bağımsız olarak şifreler ve şifrenmiş metni (Cipher Text), açmak için de aynı işlemi bloklar

üzerinde yapmaktadır. Bu bloklar 64 bit uzunluğundadır. DES aynı zamanda 64 bit uzunluğunda bir anahtar almaktadır ancak 8 bit parite için kullanıldığı için bu anahtarın geçerli olan uzunluğu 56 bit olmaktadır. 64 bitlik bir giriş bloğu tek seferde 8 piksel alır ve buna ilk permütasyon (Initial Permutation) işlemi uygulanır. Geçirilen veriler daha sonra iki alt bloğa ayrılmaktadır bunlar L, R bloklarıdır. Bu alt bloklar, farklı 48 bit uzunluğunu kullanılarak on altı yuvarlak işleminden geçtikten sonra şifreli metni elde etme işlemi sonlanmış olur. DES algoritmasında gösterilen fonksiyon bloğu genişleme permütasyonunun (32–48 bit), xoring işlemi ve ardından süstitüsyonun (48–32 bit) ve son olarak düz permütasyon kutusunun bir kombinasyonudur. İlk anahtar uzunluğu 64 bit olup, bunlardan 8 bit parite kontrolleri için ayrılmıştır. 64 bitten kalan bitler ile PC1 kullanılarak 56 bit kullanılabilir bit sayısı çıkartılmaktadır. Bu 56 bit veri iki yarıya bölünür ve 16 alt anahtar (56 bit anahtar) elde etmek için çeşitli zamanlarda döndürülür. Bu 56 bit alt anahtarlardan, 48 bit anahtarı (PC için yuvarlak anahtarlar için 16 anahtar) ayıklanır. Şifre çözme işleminde, şifreleme işlemine benzer bir yöntem izlenmektedir, ancak alt anahtarların sırası tersine çevrilmektedir. Şifreleme ve şifre çözme süreçleri çok sayıda turda ilerlese de, DES güvenlik mekanizması birçok yönden kopabilmektedir. DES, imge şifreleme için piksel değişimleri ile kullanılan bir yöntemdir. İmge şifrelemede kullanılan DES şifreleme standardının blok diyagramı şifreleme mantığı aşağıda Şekil 2 ile gösterilmiştir.



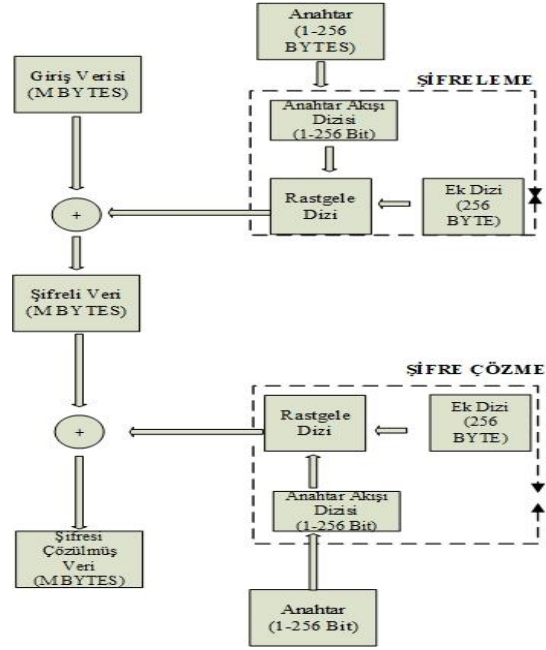
Şekil 2 DES Şifreleme Standardı Blok Diyagramı

## RC4 Şifreleme Algoritması

RC4 şifreleme algoritması, oldukça hızlı ve basit bir simetrik anahtar, akış şifreleme türüdür. İlk olarak 1987 yılında ticari olarak tasarlanmıştır. Algoritma olarak, 1 - 256 bayt arasında (genellikle 5 ve 16 bayt arasında) değişen bir anahtar uzunluğu kullanır.

Anahtar değeri 256 baytlık bir anahtar elde etmek için tekrarlanmaktadır. Bu anahtarı, permutasyon işlevini ve rastgele diziyi kullanarak, düz metnin xoring işlemi ile şifrelenmesi için bir rastgele bayt dizesi üretir. Şifre çözme işlemi benzer bir yöntem izlemektedir. Karmaşık olmayan yapısı, hızı ve kolay uygulanabilir olmasına rağmen,

algoritma birkaç zafiyete sahip olduğu için sınırlı olarak tanımlanmaktadır. RC4 şifreleme algoritmasının, diğer saldırı türlerine karşı güçlü olması için RC4A, Spritz gibi çeşitli varyantlar geliştirilmiştir. RC4 algoritmasının devamı niteliğinde RC5 VE RC6 şifreleme algoritmaları da bulunmaktadır. İmge şifrelemede kullanılan RC4 yönteminin blok diyagramı şifreleme mantığı aşağıda Şekil3 ile gösterilmiştir.



Şekil 3 RC4 Algoritması Blok Diyagramı

## AES ( Advanced Encryption Standard – Gelişmiş Şifreleme Standardı )

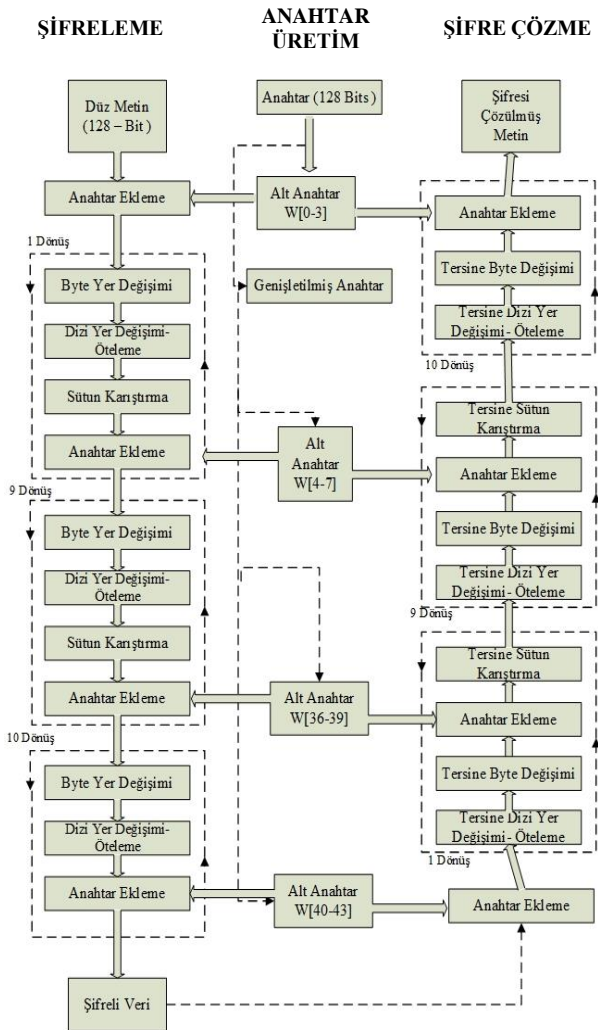
AES, Rijndael Joan Daemen ve Vincent Rijmen tarafından geliştirilen, Rijndael şifreleme ailesine ait simetrik bir şifreleme algoritmasıdır (Zeghid vd., 2007). AES algoritması, verilerin 128, 192 ve 256 bitlik anahtar boyutunu desteklemektedir ve dört temel işlem bloğuna bölünebilen 128 bit veri uzunluğuna izin vermektedir. Bu bloklar bayt dizisi üzerinde çalışır ve durum olarak adlandırılan  $4 \times 4$  matris olarak düzenlenir. Bloklar, 128-bitlik bir eşit blok boyutuna sahiptir fakat herhangi bir bit artışında güvenlik kuvveti artışı gösteren 128, 192, 256-bit'lik anahtar boyutları vardır.

Boyuttaki bu artış, daha yüksek seviyede bit kullanıldığında tekrarlar döngü sayısındaki

artışın bir sonucudur. Daha önceden yaygın olarak kullanılan DES, Fiestel ağına dayanırken; AES, bir yerleştirme ağı yapısı kullanır. Farklı şifreleme ve şifre çözme işlemleri, benzer bayt yerleşimlerini, değişim sırasını, karıştırma sütununu kullanır ve yuvarlak anahtar adımları ekler. AES algoritmasının üç kabul edilen versiyonunda çok benzer bir anahtar yöntemi vardır ve 128 bit sürümünde, 11 alt grupları gibi çok sayıda alt anahtar kullanılır. Çoğu AES sürümü, 4 9 4 matrisinden yararlanır, bu sayede şifrenin doğrusal olmayan etkisini verir ve boyut kuvvetine katkıda bulunur. Kaba kuvvet saldırısı en hızlı belgelenmiş saldırıdır ve dolayısıyla AES algoritmaları onlara karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Şekil 4 ile imge şifrelemede kullanılan AES algoritmasının blok diyagramı göstermektedir.

## Gizli Görüntülerin Anamlı Görüntüler Olarak Şifrenmesi İçin Oluşturulan İmge Şifreleme Algoritması

Son yıllarda, bulut ve internet tabanlı hizmetler dünya çapında çok popüler hale gelmiştir ve pek çok kişi bu hizmetleri bilinçsiz bir şekilde kullanmaktadır. Bu olgu, çevrimiçi verilerin gizliliğini bireyler ve kuruluşlar açısından daha da önemli bir konu haline getirmektedir ve verilerin korunması, önemli bir araştırma alanı haline gelmektedir. Şifreleme ve stenografi dâhil olmak üzere bir dizi veri koruma yaklaşımı vardır. Şifreleme, verilerin şifrenmesiyle yetkisiz erişimi engellemeyi hedeflerken, stenografinin ana amacı bir host / cover nesnesindeki verileri gizlemektir. Üçlü veri şifreleme standardı (3DES), Gelişmiş Şifreleme Standardı (AES) ve Uluslararası Veri Şifreleme gibi metin için tasarlanan bir dizi geleneksel şifreleme düzeni vardır. Dijital görüntüler ve diğer multimedya formatları, askeri, iş ve sağlık bakımı gibi sayısız hassas uygulamalarda gereklidir. Bu uygulamalar genellikle hassas verilerin depolanmasını ve aktarılmasını gerektirir. Son yıllarda çok sayıda hükümet, iş ve kişisel veri sızıntısı, gelişmiş güvenlik algoritmalarına olan artan ihtiyaçların altını çizmektedir. 3DES, AES ve IDEA gibi geleneksel şifreleme algoritmaları, metin verilerini korumak için tasarlandığından, büyük boyutlarından dolayı dijital multimedya içeriğini koruma konusunda verimsizdirler. Son yıllarda, birtakım kriptanalitik ataklar önerilmiş ve daha önce bahsedilen görüntü şifreleme algoritmalarından bazıları bozulmuş ya da güvenlik kusurlarına sahip olduğu görülmüştür. Kriptanaliz olasılığını azaltmak için, oluşturulan şifreleme görüntüleri rastgele görünmeyen bir şifreleme şemasına ilgi duyulabilir. 2015 yılında, kayıpsız görsel olarak anlamlı imge şifreleme şeması önerilmiştir. Önerilen şema iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, ön işlem ikinci aşama veri gömme olarak tanımlanmaktadır. Ön işleme aşaması, rastgele bir görüntü oluşturmak için gibi mevcut bir düzeni kullanarak giriş düz görüntüsünü şifreler. Bu aşamanın amacı



Şekil 4 AES Algoritması Blok Diyagramı



önerilen planın güvenlik seviyesini arttırmaktır. Böylece, eğer gizli görüntü çok hassas değilse, bu aşama atlanabilir. Bu çalışmanın ana katkısı olan yerleştirme aşaması, frekans alanında gerçekleştirilir. 2D Ayrık Dalgacık Dönüşümü (LWT) kullanarak ana görüntüyü dört alt-bant, yani bir yaklaşım matrisi ve üç detay matrisi halinde ayrıştırır. Daha sonra ön işlem aşamasından kaynaklanan (karıştırılmış) görüntüyü ayrıştırma katsayılarına karıştırır. Son olarak, nihai stego-image ters dönüşüm yoluyla üretilir. Simülasyon sonuçları, önerilen planın yüksek kaliteli stego images ürettiğini ve bir dizi güvenlik tehdidine karşı sağlam olduğunu göstermektedir. Bao ve Zhou yöntemi 2015 yılında Bao ve Zhou tarafından önerilmiş (Yang vd., 2017) ve literatürde bilinen ilk VMIES (Visually Meaningful Image Encryption Scheme) metodudur (Bao ve Zhou, 2015). Ön şifreleme ve referans görüntü şifreleme bölümlerinden oluşur. Bu yöntemde, ön şifreleme yönteminin literatürdeki güvenli görüntü şifreleme yöntemlerinden birini kullanabileceği açıkça görülmektedir. Yöntemin özgünlüğü referans görüntü şifrelemesidir. BZ referans görüntü şifreleme yöntemi Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 5 ile yeni imge şifreleme konseptine ait akış şeması, Şekil 6 ile yeni imge şifreleme yöntemine ilişkin blog diagramı verilmiştir.

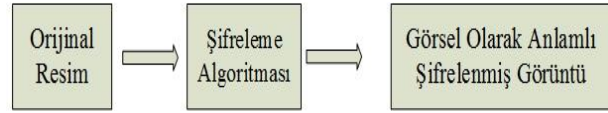
**Algoritma 1.** BZ referans görüntü şifreleme yöntemi algoritması

<p><b>Giriş</b></p> <p><b>P:</b> W X H boyutuna sahip önceden şifrelenmiş görüntü.</p> <p><b>R:</b> 2W x 2H boyutuna sahip referans görüntü.</p> <p><b>K2:</b> Referans görüntü şifreleme anahtarı</p> <p><b>Çıkış</b></p> <p><b>E:</b> 2W x 2H boyutuna sahip son durumda elde edilen şifreli görüntü.</p>
<p><b>1:</b> Tamsayı 2D DWT uygulanır ve K2 kullanarak LL, LH, HL ve HH alt-bantlarını elde edilir.</p> <p><b>2:</b> for i=1 to W do</p> <p><b>3:</b> for j=1 to H do</p> <p><b>4:</b> <math>HL_{i,j} = \lfloor \frac{P_{i,j}}{10} \rfloor</math></p> <p><b>5:</b> <math>HH_{i,j} = P_{i,j} \pmod{10}</math></p> <p><b>6:</b> endfor</p> <p><b>7:</b> endfor</p> <p><b>8:</b> Ters tamsayı 2D DWT uygulanır ve son durumda şifreli görüntü olan E elde edilir.</p>

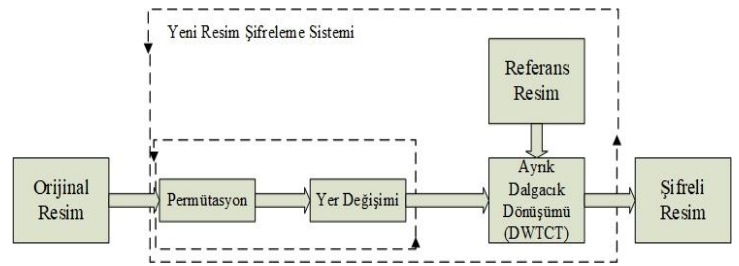
BZ’nin imge şifreleme yöntemine ait referans görüntünün, şifre çözme şemasına işlem akışı 9. ve 10. satır olarak Algoritma 2’de verilmiştir.

**Algoritma 2.** BZ’nin imge şifreleme yöntemi şifre çözme aşaması algoritması

**9-**  $[LL, LH, HL, HH] = DWT2(R, K_2)$   
**10-**  $P = HL \times 10 + HH$



Şekil 5 Yeni İmge Şifreleme Konsepti



Şekil 6 Yeni İmge Şifreleme Yönteminin Blog Diagramı

## İmge Şifrelemede Kullanılan

### Performans Metrikleri

Bir imgenin şifrelenmesinde kullanılan birçok algoritma ve şifreleme yöntemi bulunmaktadır. İmge şifrelemede kullanılan bu şifreleme algoritmalarından elde edilen sonuçların incelenmesi ve bir görsel üzerinde bir değişiklik yapıp yapılmadığının tespiti için imge şifreleme analizi yapılabilmektedir (Ping vd., 2017) Bu analiz histogram, korelasyon vb. metrikler ile yapılmaktadır.

### Histogram Analizi

Bir görüntünün histogramı, bir dijital görüntüde mevcut olan piksel yoğunluğu değerlerinin frekans dağılımının grafiksel bir gösterimidir. İdeal olarak, şifrelenmiş bir resmin histogramı düzgün bir şekilde yayılmalı ve orijinal görüntünün histogramı ile benzerlik göstermemelidir.

AES vb. birçok imge şifreleme tekniği, kriptanaliz riski altındadır bu nedenle şifreleme sonucunda düzenli bir histogram dağılımı gerekmektedir. Histogram analizi ile imge üzerinde herhangi bir değişikliğe gidilip gidilmediğinin de tespiti yapılabilmektedir.

## Korelasyon analizi

İmge şifrelemede şifrelenmiş bir görüntü, bitişik pikseller arasında bir korelasyona sahip olmamalıdır. Mevcut herhangi bir korelasyon, yetkisiz bir kullanıcının görüntünün bir kısmını yeniden oluşturması veya orijinal görüntünün kendisini daha kötü hale getirmesi için kullanılabilir. Korelasyon katsayıları -1 ile +1 arasında değişmektedir, burada aşırı uçlar sırasıyla mükemmel bir negatif veya pozitif doğrusal ilişkisini göstermektedir. Sıfırın katsayı değeri, bitişik piksel değerleri arasında doğrusal bir ilişkiyi temsil etmemektedir. Bir görüntüde, bitişik pikseller arasındaki yatay, dikey ve çapraz oryantasyon katsayısı matematiksel olarak eşitlik 1 ile 4 arasında ki gibi ifade edilebilir.

$$r_{\alpha\beta} = \frac{cov(\alpha,\beta)}{\sqrt{D(\alpha)}\sqrt{D(\beta)}} \quad (1)$$

$$E(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i \quad (2)$$

$$D(\alpha) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - E(\alpha))^2 \quad (3)$$

$$cov(\alpha,\beta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - E(\alpha)) (\beta_i - E(\beta)) \quad (4)$$

## Diferansiyel Saldırı Analizi

Diferansiyel saldırı analizi, pikseldeki en küçük bir değişikliği veya orijinal görüntünün anahtar değeri sağlandıktan sonra şifrelenmiş görüntüdeki değişiklikleri belirlemek için yapılan analiz türüdür. Bu analizi yapmak için, hem orijinal görüntünün hem de değiştirilmiş olan imgenin, aynı şifreleme tekniği kullanılarak şifrelenmesi gerekmektedir. NPCR parametresi, net piksel değişim oranı; UACI, yoğunluktaki

birleşik ortalama değişimi oranı olarak tanımlanmaktadır. UACI oranı, kullanıldığı şifreleme tekniğinin çeşitli saldırılara karşı dayanıklılık oranı olarak da tanımlanmaktadır. NPCR oranı, orijinal imge ile piksel değişikliği yapılmış olan imgenin karşılaştırıldığında ki şifreli görüntünün piksel sayısındaki değişim oranını belirtir. C1 parametresi, orijinal imgeyi C2 parametresi, piksel değişimi olmuş olan imgeyi temsil etmektedir. NPCR değeri hesaplaması, eşitlik 5 ile gösterilmektedir.

$$NPCR = \frac{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W D(i,j)}{W \times H} \times 100\% \quad (5)$$

H ve W parametreleri görüntünün yükseklik ve genişlik değerleridir. D parametresi, C1 ve C2 görüntülerine eşdeğer büyüklükte bir bipolar diziyi temsil etmektedir. Bileşen olarak sadece 0 veya 1 değerleri kullanılmaktadır. D (i, j) değeri hesaplaması, eşitlik 6 ile gösterilmektedir.

$$D(i,j) = \begin{cases} 0 & C1(i,j) = C2(i,j), \\ 1 & C1(i,j) \neq C2(i,j) \end{cases} \quad (6)$$

UACI değeri, düz ve şifrelenmiş görüntü arasındaki ortalama yoğunluk farkıdır. UACI değeri hesaplaması, eşitlik 7 ile gösterilmektedir. Hesaplama da ki L parametresi; ilgili kırmızı, yeşil ve mavi kanalları temsil eden bitlerin sayısıdır.

$$UACI = \frac{1}{W \times H} \left[ \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W \frac{|C1(i,j) - C2(i,j)|}{2^L - 1} \right] 100\% \quad (7)$$

## Anahtar Uzay (Alan) Analizi

Anahtar alan analizi, bir kaba kuvvet saldırısına karşı dayanıklı bir şifreleme şemasının fizibilitesini tanımlayan önemli bir parametredir. Bunu yapabilmek için, şifrenin anahtar aralığının büyük bir kombinasyonu olmalıdır. Kaos temelli algoritmaların tamamı, kaba kuvvet saldırılarına direnecek kadar büyük bir anahtar alana sahiptir fakat bazı imge şifreleme algoritmaları küçük anahtar alanlara sahip olduğu için temel saldırı türüne karşı savunmasız hale gelmektedir. Tablo 1 ile yaygın olarak kullanılan imge şifreleme

algoritmalarına ait anahtar alan aralığı değerlerini sunmaktadır.

**Tablo 1.** İmge şifreleme algoritmalarına ait anahtar alan aralığı değerleri

Algoritma	Anahtar Aralığı
Vigenere	$2^{128}$
DES	$2^{56}$
IDEA	$2^{128}$
Blowfish	$2^{64}$
RC4	$2^{256}$
RC5	$2^{128}$
AES	$2^{128}$

### Anahtar Hassasiyet Analizi

Anahtar duyarlılık analizi, imge şifrelemede kullanılan algortmada ki anahtarda meydana gelen bir değişimi tespit etmek için kullanılan analiz türüdür. Analiz, piksel karşılaştırması ile yapılmaktadır. Şifrelenmiş görüntünün piksel karşılaştırması ve NPCR oranı, anahtar değerinde ki dakika değişikliği (bir bit değişimi) için gözlemlenmektedir. Bir şifreleme şeması,

iki koşula göre etkin olarak kabul edilir: İlk koşul, her iki imgenin de şifreli olarak ayrı ayrı şifrelenmiş görüntüler oluşturmak için şifrelerde bağımsız olarak kullanılması durumunda, her iki şifrelenmiş görüntünün de tamamen farklı olması gerektiği belirtilmektedir. İkinci koşul, her iki imgenin de aynı şifrelenmiş görüntünün şifresini çözmek için bağımsız olarak kullanıldığı takdirde, sadece orijinal anahtardan deşifre edildikten sonra, orijinal görüntünün sağlanması, diğerinin ise herhangi bir alakalı sonuç vermemesi gerektiği belirtilmektedir.

### Zaman Karmaşıklığı Analizi

Zaman karmaşıklığı analizi, yürütme talimatı tarafından hesaplanan zaman miktarıdır. Manuel yaklaşımı, temel işlemlerin kendileriyle ilişkili sabit bir zamana sahip olmasından dolayı sette bulunan toplam temel yürütme işlemleri kullanılarak yapılabilir. Burada, hesaplanan zaman miktarı, resmin şifreleme ve şifre çözme süresini temsil eder ve yerleşik işlemler tarafından hesaplanır. Zaman karmaşıklığı, sistem konfigürasyonu ve kullanılan görüntü gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

## İmge Şifrelemede Kullanılan Algoritmaların Performans Metriklerinin Karşılaştırılması

**Tablo 2.** İmge şifrelemede kullanılan algoritmaların performans metriklerinin karşılaştırılması

Şifreleme Algoritması	İmge Şifreleme	Histogram Dağılımı	Piksel Duyarlılığı	Anahtar Duyarlılığı	Entropi Değeri
DES	Orta	Artan	Orta	Yüksek	Yüksek
RC4	Yüksek	Tek Düzeye	En Düşük	Yüksek	Yüksek
RC5	Orta	Artan	Orta	Yüksek	Yüksek
TDES	Orta	Artan	Orta	Yüksek	Yüksek
AES	Orta	Artan	Orta	Yüksek	Yüksek
Vigenere	En az	Artan	En Düşük	Düşük	Yüksek
IDEA	Orta	Artan	Orta	Yüksek	Yüksek

## İmge Şifrelemede Kullanılan Algoritmalarında Piksel Değerindeki Bir bitlik Değişiklik İçin NPCR ve UACI Değerleri Karşılaştırılması

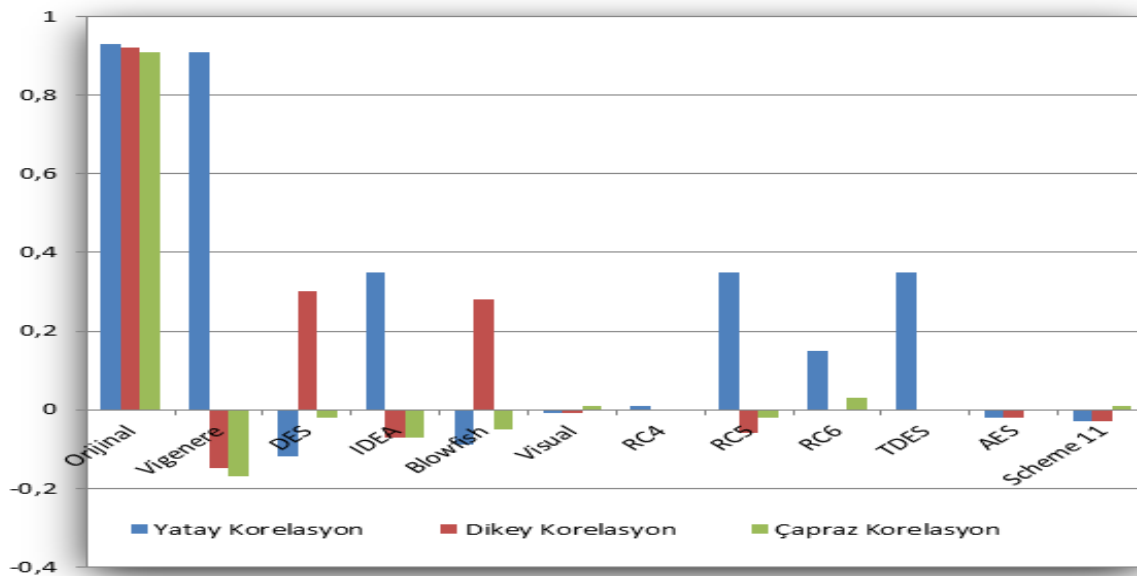
**Tablo 3.** İmge şifrelemede kullanılan algoritmalarda piksel değerindeki bir bitlik değişiklik için NPCR ve UACI değerleri sonuçları

Boyut	128 x 128		192 x 192		256 x 256	
	NPCR	UACI	NPCR	UACI	NPCR	UACI
DES	$4.88 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-4}$	$2.17 \times 10^{-4}$	$5.12 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$5.43 \times 10^{-5}$
RC4	$6.10 \times 10^{-5}$	$2.87 \times 10^{-6}$	$2.71 \times 10^{-5}$	$1.28 \times 10^{-6}$	$1.53 \times 10^{-5}$	$7.18 \times 10^{-7}$
AES	$9.77 \times 10^{-4}$	$3.21 \times 10^{-4}$	$4.34 \times 10^{-4}$	$1.42 \times 10^{-4}$	$2.44 \times 10^{-4}$	$6.21 \times 10^{-5}$
Vigenere	$6.10 \times 10^{-5}$	$4.79 \times 10^{-6}$	$2.71 \times 10^{-5}$	$2.13 \times 10^{-6}$	$1.53 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^{-6}$
IDEA	$4.88 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-4}$	$2.17 \times 10^{-4}$	$8.83 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$4.09 \times 10^{-5}$
TDES	$4.88 \times 10^{-4}$	$1.57 \times 10^{-4}$	$2.17 \times 10^{-4}$	$6.45 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$4.97 \times 10^{-5}$
Visual	$6.10 \times 10^{-5}$	$2.39 \times 10^{-7}$	$2.71 \times 10^{-5}$	$1.06 \times 10^{-7}$	$1.53 \times 10^{-5}$	$5.98 \times 10^{-8}$

### İmge Şifrelemede Kullanılan Algoritmaların Korelasyon Analizi

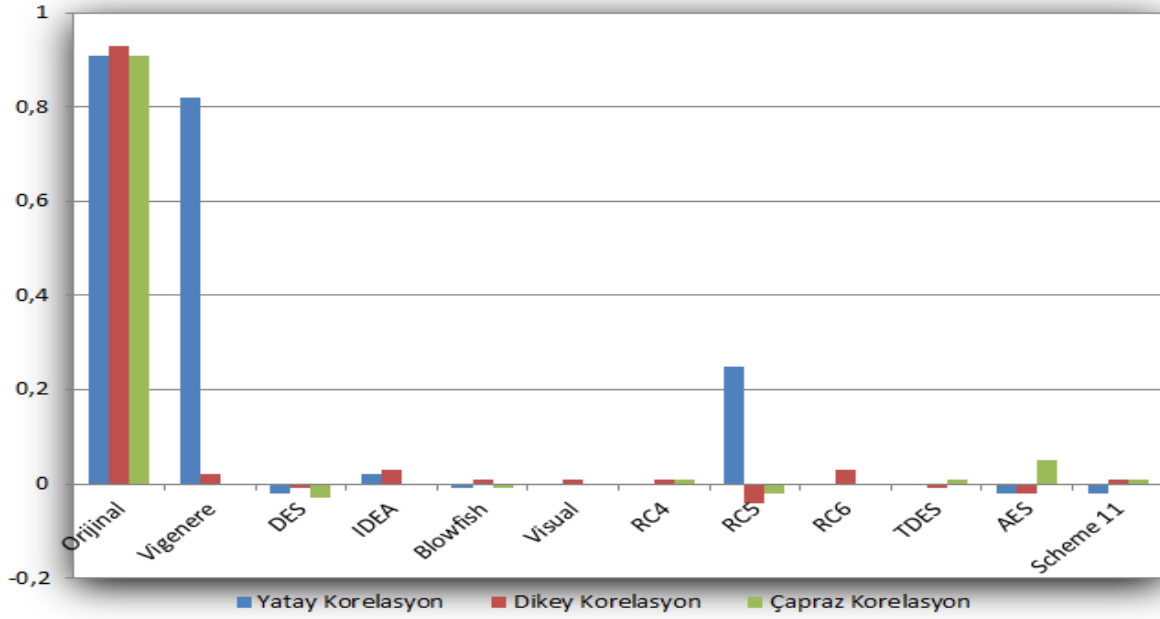
Özel bilgilerin güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulan ve yaygın olarak kullanılan imge şifreleme algoritmaları ile farklı boyuttaki görsellere uygulanan korelasyon analizi istatistiksel sonuçları aşağıda grafiksel olarak

görselleştirilmiştir. Korelasyon analizi sonucunda, üzerinde çalışılan her imge şifreleme algoritması için yatay, dikey ve çapraz korelasyon analizi matematiksel hesaplama sonuçları karşılaştırılmıştır.  $128 \times 128$  boyutundaki görüntüde kullanılan şifreleme tekniği için korelasyon analizi karşılaştırma sonuçları, Şekil 7 ile gösterilmiştir.



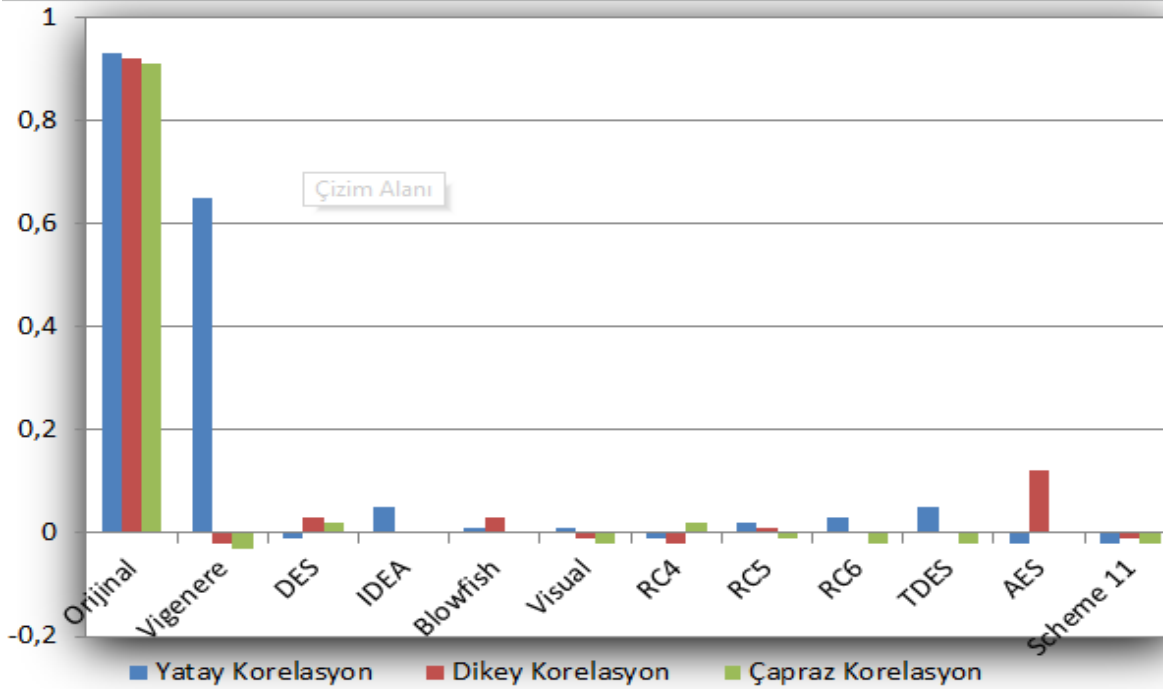
Şekil 7  $128 \times 128$  Boyutunda Görüntüde Kullanılan Şifreleme Tekniğinin Korelasyon Analizi

192 × 192 boyutunda görüntüde kullanılan şifreleme tekniği için korelasyon analizi karşılaştırma sonuçları, Şekil 8 ile gösterilmiştir.



Şekil 8 192 × 192 Boyutunda Görüntüde Kullanılan Şifreleme Tekniğinin Korelasyon Analizi

Şekil 9, 256 x 256 boyutunda görüntüde kullanılan şifreleme tekniği için korelasyon analizi karşılaştırma sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 9 256 × 256 Boyutunda Görüntüde Kullanılan Şifreleme Tekniğinin Korelasyon Analizi

## İmge Şifrelemede Güvenlik Analizi

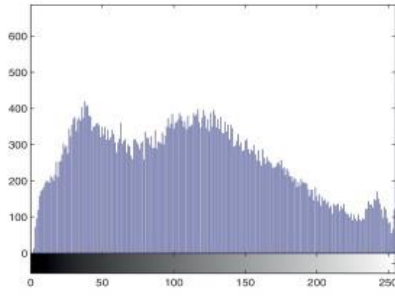
Dijital ortamda kullanılan güvenlik kavramı, kriptografi için çok önemli bir unsurdur. İyi bir görüntü şifreleme şeması; bilinen düz metin saldırısı, şifreli metin saldırısı, istatistiksel analiz saldırısı ve kaba kuvvet saldırıları gibi çeşitli saldırılara karşı dayanıklı olmalıdır. Bir şifreleme algoritmasını kriptolojide ederken genel varsayım, kriptolojist'in anahtar dışındaki algoritmanın tüm ayrıntılarını bilmesidir. Kriptolojide, şifrelenmiş verileri çözümlenmesi ve anahtarı kullanmadan şifresini kırmaya çalışmaktır. Kriptolojide, düz metne (plaintext), şifrelere veya kriptolojik sistemin diğer yönlerine ne kadar eriştiğine bağlı olarak kriptolojide gerçekleştirilecek çok sayıda teknik bulunmaktadır. En yaygın saldırı türlerine örnek olarak şifreli metin saldırısı, seçilmiş düz metin saldırısı, seçilmiş şifreli saldırı, bilinen düz metin saldırısı verilebilir. Şifreli metin saldırısında, kriptanalist bazı şifreleme algoritmasına yada şifreleme anahtarına dair bazı parçalara sahiptir. Muhtemelen en çok kullanılan kriptanaliz tipidir. Seçilmiş düz metin saldırısında ise kriptanalist şifreleme algoritmasına sahiptir. Bu nedenle, herhangi bir düz metin (plaintext) seçebilir ve karşılık gelen şifreleri elde edebilir. Bir sonraki saldırı, en çok kullanılan saldırılardan olan seçilmiş şifreli saldırıdır. Bu saldırıda, kriptanalist şifre çözme algoritmasına sahiptir. Bu nedenle herhangi bir şifreleme metni seçebilir ve karşılık gelen düz metinleri(plaintext) elde edebilir. Son olarak; bilinen düz metin saldırısı, kriptanalist, şifreleme algoritmasına dair bazı düz metinlere (plaintext) ve karşılık gelen şifreleme halkalarına sahiptir. Bu dört saldırının her birinde, amaç anahtar belirlemektir. Anahtar yukarıda bahsedilen saldırılardan biriyle öğrenildiği takdirde, kriptosistem güvensiz kabul edilir. Şifreleme kalitesini kanıtlamak için şifreleme algoritmasına güvenlik analizleri gereklidir. Şifreleme algoritmalarının analizi için;

1. Histogram Analizi
2. Korelasyon Katsayısı,
3. Doğrusal ve Diferansiyel Saldırı (NPCR)
4. Bilgi Entropisi Analizi
5. Şifreleme Kalitesi
6. Anahtar Alan Analizi
7. Şifreli anahtarlar

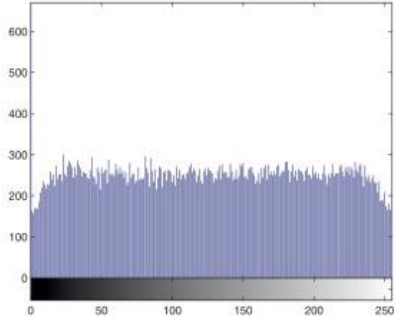
gibi görüntünün güvenliğini ölçmek amacıyla çeşitli güvenlik analizleri gerçekleştirilmektedir.

## İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Histogram Dağılımı Kullanımı

İmge histogramı, bir görüntünün istatistiksel bir özelliğidir ve piksellerin her bir gri düzeyindeki piksel sayısını çizerek görüntüye ne şekilde dağıldığını gösterir. Bir şifre görüntüsündeki oldukça eşit sayıda gri düzey, gri seviyenin düzgün dağılımını ve dolayısıyla iyi bir rasgelelik düzeyini gösterir. Histogram analizi, bir görüntüdeki piksel değerlerinin ağırlığının grafiksel bir gösterimidir. Histogram grafiğini inceleyerek, görüntünün tonu hakkında bilgi edinebilirsiniz. Dağıtım değerleri eşit veya en azından yakınsa, histogram dağılımı iyi olduğu anlamına gelmektedir. Orijinal görüntünün histogram dağılım grafiğinin incelenmesi, dengesiz bir dağılıma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Test edilen tüm şifreleme algoritmaları dengeli ve yakın bir dağıtıma sahiptir. Sonuç olarak, şifreleme algoritması dengeli ve iyi bir histogram dağılımı sağlar ve bunun sonucunda bir imgenin histogram analizine bakılarak şifreli mi yoksa şifresiz mi olduğu histogram dağılımına göre anlaşılabilir. Örnek bir dağılımı ait histogram sonuçları Şekil 10 ile verilmiştir. Şekil 10 (a) görseli ile orijinal görüntünün histogram sonucu, Şekil 10 (b) görseli ile şifreli imgenin histogram sonucu grafiksel olarak sunulmuştur.

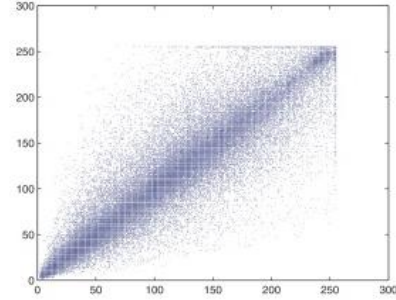


(a)

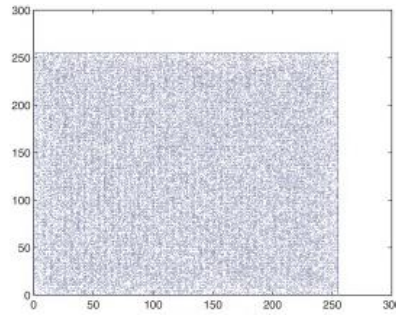


(b)

Şekil 10 Histogram Sonuçları (a) Orijinal görüntünün histogram sonucu (b) Şifreli görüntünün histogram sonucu



(a)



(b)

Şekil 11 Komşu Pixellerin Korelasyon Sonuçları (a) Orijinal görüntünün korelasyon analizi (b) Şifreli görüntünün korelasyon analizi

## İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Korelasyon Katsayısı Kullanımı

Korelasyon katsayısı analizi, iki rastgele değişken arasındaki korelasyona dayanarak, bu ilişkinin bağımsız olduğunu simgelemektedir. Korelasyon doğrusal ise, korelasyon dağılımının iyi olmadığı anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, korelasyon doğrusal değilse, şifrelemenin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Örnek bir dağılımı ait korelasyon sonuçları Şekil 11 ile verilmiştir. Şekil 11 (a) görseli ile orijinal görüntünün korelasyon analizi sonucu, Şekil 11 (b) görseli ile, şifreli görüntünün korelasyon analizi sonucu grafiksel olarak sunulmuştur.

## İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Doğrusal ve Diferansiyel Saldırı (NPCR – UACI Analizi)

NPCR (Piksel Değişim Oranı Sayısı) ve UACI (Birleştirilmiş Ortalama Değişim Şiddeti), farklı ataklara karşı imge şifreleme algoritmasının dayanıklılığına uygun olarak dirençli şifreleme algoritmasını bulmak için kullanılan bir kriptanaliz yöntemidir. Orijinal görüntülerde küçük değişikliklerin şifrelemeyi nasıl etkilediğini tespit etmek için de kullanılır. Bu yöntem, şifrelenmiş bitler ve orijinal görüntüden seçilen rastgele bitlerle yapılan şifreleme değişikliklerini kullanır ve bu şekilde şifrelenmiş görüntünün şifresini çözmeye çalışır. Orijinal görüntüdeki değişikliklerin bir sonucu olarak şifrelemede büyük değişiklikler meydana gelirse, saldırıya dayanıklı şifreleme elde edilir. Şifreleme algoritmalarının güvenlik ve performans karşılaştırma tablosu Tablo 4 ile verilmiştir.

**Tablo 4.** Algoritmalar arası kriter karşılaştırma sonuçları

	Kaos Algoritması	AES Algoritması	Önerilen Algoritma
NPCR	99.60672	99.63245	99.62987
UACI	31.24768	31.87236	31.83459
Bilgi Entropisi	7.95454	7.95912	7.95667
Şifreleme Kalitesi	29.67574	35.84217	35.87899
Şifreleme Süresi(sn.)	1.21468	27.36952a	1.67342
Şifre Çözme Süresi(sn.)	1.16734	29.21683	1.30321
Toplam Süre(sn.)	2.38202	56.58635	2.97663

### İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Bilgi Entropisi Analizi Kullanımı

Bilgi entropi analizi, şifrelenmiş verilerin karmaşıklığını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Şifrelenmiş verilerin karmaşıklık oranı arttıkça orijinal veriler hakkında bilgi elde etmekte bir o kadar zorlaşmaktadır. Şifreleme için optimum bilgi entropi değeri 8 olarak tanımlanmaktadır. Hesaplanan değer, 8 tamsayı değerine yaklaştıkça, şifreleme kalitesi artmaktadır. Aşağıda eşitlik 8 simgesinde yer alan matematiksel denklem ile karmaşıklık değeri hesaplanabilmektedir.

$$\text{ShanEn}(x) = - \sum_{i=1}^N (P_i(x)) (\log_2 P_i(x)) \quad (8)$$

### İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Şifreleme Kalitesi Kullanımı

Şifreleme kalitesi, şifreli ve orijinal görüntülerin piksel değerlerini karşılaştırarak elde edilen bir değerdir. Piksel değerindeki değişim ne kadar büyük olursa, daha yüksek şifreleme kalitesine sahip olduğu anlamına gelmektedir. İmge şifreleme kalitesi değer hesaplama matematiksel fonksiyonu eşitlik 9 ile gösterilmektedir.

Şifreleme kalitesi değeri, iki görüntü arasındaki sapma olarak ifade edilmektedir. P değeri;

orijinal görüntüyü, C değeri; şifrelenmiş görüntüyü ifade etmektedir.

$$\text{Şifreleme Kalitesi} = \frac{\sum_{L=0}^{255} |H_L(C) - H_L(P)|}{256} \quad (9)$$

### İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Anahtar Alan Analizi Kullanımı

Boyut olarak geniş anahtar alanlı bir şifreleme algoritması, güçlü saldırılara karşı oldukça dayanıklıdır. Bunun nedeni, anahtar alanın geniş olmasından dolayı, saldırganların anahtarı bulmasının zor olmasıdır. Kaos tabanlı şifrelemede, kaotik sistemin boyutu ve sistem parametrelerinin sayısı arttıkça, sistem anahtar alanı genişler ve sistem daha karmaşık hale gelir. Ancak, sistem daha karmaşık hale geldiği için süreç yükünü artırdığı için dengeli bir yapıya ihtiyaç vardır. AES algoritması 128 bit şifreleme için 2 üzeri 128 bit anahtar alana sahiptir. Kaotik sistem ve AES algoritması anahtar alanı karşılaştırıldığında, kaotik sistem anahtar alanı değerinin çok daha fazla olduğu görülmektedir. Anahtar boyutu alanı ne kadar geniş olursa şifrenin aşılması bir o kadar güç olacaktır ve güvenlik seviyesi yüksek olacaktır.

### İmge Şifreleme Güvenlik Analizinde Şifreli Anahtarlama Kullanımı

Kaotik sistemlerin en önemli özelliklerinden biri, başlangıç koşullarına ve sistem parametrelerine çok hassas bir şekilde bağlı olmalarıdır. Başlangıç koşullarında veya sistem parametrelerinde küçük bir değişiklik bile tamamen farklı bir yörüngeye ve değerlere yol açacaktır. Güvenli bir şifreleme sisteminde, anahtardaki küçük bir değişiklik şifreli verilerin şifresini çözmeyi engelleyebilmelidir. Bu noktada kaotik sistemlerin ilk koşullara ve sistem parametrelerine çok hassas bir şekilde bağlı olması, güvenli bir şifreleme için büyük önem taşımaktadır ve bu özellikler bu gereksinimi karşılamaktadır. Örneğin, rasgele sayı üretimi için kullanılan RC4 algoritmasının girişi, önceki adımdan geldiğinden, küçük bir değişiklik bile tüm sistemi etkiler. Bu nedenle tasarlanan



şifreleme sisteminin anahtar hassasiyetinin yüksek olduğu söylenebilir.

## Tartışmalar

Bu makalede imge şifreleme yöntemlerinden söz edilmiştir. Vigenere, DES, AES, RC4 ve BZ'nin yönteminden bahsedilmiştir. Vigenere klasik bir şifreleme algoritmasıdır ve frekans analizi saldırısına karşı dayanıksızdır. Bu sebepten dolayı modern şifreleme algoritması olarak kullanılmamaktadır. DES 2000'li yıllara kadara blok şifreleme standardı olarak kullanılan bir algoritmadır ancak bu sistemde diferansiyel atağa karşı dayanıksız olduğu bilinmektedir. AES günümüzde kullanılan blok şifreleme standardıdır. AES'in en büyük problemi ise yüksek maliyetli olması ve ECB modunun imge şifreleme için yetersiz olmasıdır. Yüksek maliyet problemini çözebilmek için akan şifreleme yöntemleri kullanılmaktadır. RC4 gibi sistemler hızlıdır, iyi istatistiksel özelliklere sahiptir ancak bu tür sistemleri de kırabilmek için başarılı ataklar mevcuttur. BZ'nin algoritması kaotik yapılar ve steganografiyi bir arada kullanan bir algoritmadır. Burada temel amaç kaotik yapıların sahip olduğu problemleri gidermek için steganografi kullanmak ve çok seviyeli bir güvenlik sistemi önermektir. Bu sistemde görülen en önemli problem ise yüksek gürültü oranına sahip olmasıdır.

## Sonuç ve Öneriler

Günümüzde, büyüyen teknolojiye bağlı olarak bilgisayar korsanları, teknolojiyi ve onu ele geçirme yollarını her geçen gün biraz daha farklı teknikler ile gerçekleştirmektedir. Veri aktarımı, kurumsal alanlar, sanal ortam alışverişleri vb. birçok alanda veri aktarımı internet üzerinden gerçekleşmektedir. Dijital ortamda gerçekleşen bu veri aktarımında, kişisel ve özel bilgilerin güvenliğinin iyi sağlanması gerekmektedir. Bilim insanları ve araştırmacılar görüntü verisinin korunması ile ilgili birçok teknikler geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, dijital ortamda aktarımının yapıldığı özel ve kişisel verilerin güvenliğini sağlamak amacıyla oluşturulan ve yaygın olarak kullanılan bazı imge şifreleme algoritmalarının çalışma yapısı ve mantığı

incelenerek çeşitli literatür taramaları yapılmıştır. İncelenen algoritmalar arası performans ve metrik karşılaştırmaları yapılmış ve istatistiksel veriler elde edilmiştir. Elde edilen veriler grafik ve tablolar ile görselleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında imge şifrelemenin güvenliğinin nasıl sağlandığı ve güvenli analizi için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir.

## Kaynaklar

Aphetsi Kester, A cryptosystem based on Vigenère cipher with varying key, ISSN: 2278 – 1323 International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 1, Issue 10, December 2012

LongBao, YicongZhou, Image encryption: Generating visually meaningful encrypted images, Department of Computer and Information Science, University of Macau, Macau, China

Manju Kumari . Shailender Gupta . Pranshul Sardana, A Survey of Image Encryption Algorithms , DOI 10.1007/s13319-017-0148-5, 3D Research Center, Kwangwoon University and Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2017

Manjula K G, Color Image Encryption and Decryption Using DES Algorithm, M.Tech (EC) (4th SEM), Dept. of ECE , Malnad College of Engineering , Hassan, India, Volume: 03 Issue: 07 | July-2016, e-ISSN: 2395 -0056 p-ISSN: 2395-0072

M. Zeghid, M. Machhout, L. Khriji, A. Baganne, and R. Tourki, A Modified AES Based Algorithm for Image Encryption, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:1, No:3, 2007

Ping Ping, Designing permutation substitution image encryption networks with Henon map, College of Computer and

Information, Hohai University, Nanjing  
210098, China

R. Parvaz, A combination chaotic system and  
application in color image encryption,  
Department of Mathematics, University  
of Mohaghegh Ardabili, 56199-11367  
Ardabil, Iran

Sanjay Kumar, Image Encryption using  
Simplified Data Encryption Standard (S-  
DES), International Journal of Computer  
Applications (0975 – 8887) Volume 104  
– No.2, October 2014

Yu-Guang Yang, Eliminating the texture features  
in visually meaningful cipher images,  
College of Computer Science and  
Technology, Beijing University of  
Technology, Beijing 100124, China

N.K.Pareeka, Vinod Patidara, K.K.Sud, Image  
encryption using chaotic logistic map,  
Volume 24, Issue 9, 1 September 2006,  
Pages 926-934, Department of Physics,  
College of Science Campus, M.L.S.  
University, Udaipur 313002, Rajasthan,  
India

Shi Liu, Changliang Guo, John T. Sheridan,  
A review of optical image encryption  
techniques, Volume 57, April 2014,  
Pages 327-342, School of Electrical,  
Electronic and Communication  
Engineering, College of Engineering and  
Architecture, University College Dublin,  
Belfield, Dublin 4, Ireland

Aloka Sinha, Kehar Singh, A technique for  
image encryption using digital signature,  
Volume 218, Issues 4–6, 1 April 2003,  
Pages 229-234, Photonics Group,  
Department of Physics, Indian Institute of  
Technology Delhi, New Delhi 110016,  
India

Chin-Chen Chang, Min-Shian Hwang, Tung-  
Shou Chen, A new encryption algorithm  
for image cryptosystems, Volume 58,  
Issue 2, 1 September 2001, Pages 83-91,

Department of Computer Science and  
Information Engineering, National  
Chung Cheng University, Chaiyi,  
Taiwan, ROC

S.Behnia, A. Akhshani, H. Mahmodi, A.  
Akhavan, A novel algorithm for image  
encryption based on mixture of chaotic  
maps, Volume 35, Issue 2, January 2008,  
Pages 408-419, Department of Physics,  
IAU, Urmia, Iran

Rinki Pakshwar, Vijay Kumar Trivedi, Vineet  
Richhariya, A Survey On Different Image  
Encryption and Decryption Techniques,  
Rinki Pakshwar et al, / (IJCSIT)  
International Journal of Computer  
Science and Information Technologies,  
Vol. 4 (1) , 2013, 113 – 116, Dept. of  
Computer Science Lakshmi Narain  
College of Technology, Bhopal(India)

Majid Khan, Tariq Shah, A Literature Review on  
Image Encryption Techniques, 22  
October 2014, Quaid-i-Azam University,  
Islamabad, Pakistan

## Image Encryption Methods and Algorithms

### Extended Abstract

Depending on the development of technology, the transfer of digital images over the Internet has become widespread. In the transmission of digital images used in various public and official places over the internet, data protection, data integrity and confidentiality should be ensured. The safety and confidentiality of the transmission of digital images provide keyed and keyless with various encryption algorithms. Today, image security is becoming more and more important. One of the reasons for this is that confidential images are transmitted to the public over the internet and a third person can access this transfer between two people. Therefore, encryption was considered an effective and direct technique to ensure the security of private information. According to architects, methods for encryption can be divided into three categories. They are categorized as permutations, displacements, permutations and displacements. In this article, various literature surveys have been done the working structure and logic of some commonly used image encryption algorithms, which are used to ensure the security of private and personal data that is transmitted in digital environment. The data obtained are visualized by graphs and tables. Explained the methods used for the security and secure analysis of image encryption in the final stage of the article. The main purpose of this article is to compare the methodology of some image encryption algorithms used to ensure the security of personal information to introduce awareness among algorithms. First of all, image encryption is explained in this article. Algorithms used in Image Encryption according to the flow of the article were examined. The structure and logic are examined encryption algorithms are

1. Vigenere Encryption Algorithm
2. DES (Data Encryption Standart )
3. RC4 Encryption Algorithm
4. AES ( Advanced Encryption Standard)
5. An algorithm for encryption of secret images into meaningful images(Bao ve Zhou encryption method).

Immediately after the algorithm analysis, Performance Metrics Used in Image Encryption were examined. The metrics reviewed are

1. Histogram Analysis
2. Correlation analysis
3. Differential Attack Analysis
4. Key Space Analysis
5. Key Accuracy Analysis
6. Time Complexity Analysis.

After metric inspection , security was reviewed analysis in image encryption. Security analysis under the topic title,

1. Histogram Distribution in Image Encryption Security Analysis
2. Correlation Coefficient in Image Encryption Security Analysis
3. Linear and Differential Attack in Image Encryption Security Analysis (NPCR - UACI Analysis)
4. Knowledge Entropy Analysis in Image Encryption Security Analysis
5. Encryption Quality in Image Encryption Security Analysis
6. Key Space Analysis in Image Encryption Security Analysis
7. Encrypted Switching in Image Encryption Security Analysis was examined.

Comparison of the image encryption algorithms, metrics and security analyzes' results were graphically visualized.

**Keywords:** image encryption, privacy of personal data, image encryption process and methodology



# Nokta Bulutları Üzerinden 3B Zernike Momentlerin Güçlü Bir Şekilde Hesaplanması

**Erdal ÖZBAY\***

Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[erdalozbay@firat.edu.tr](mailto:erdalozbay@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0002-9004-4802, Tel: (424) 237 00 00 (6303)

**Ahmet ÇINAR**

Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[acinar@firat.edu.tr](mailto:acinar@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-5528-2226, Tel: (424) 237 00 00 (6315)

Geliş: 28.02.2019, Revizyon: 06.05.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

*Bu çalışmada, üç boyutlu (3B) nokta bulutu üzerinden Zernike Moment'lerin (ZM) etkili bir şekilde hesaplanması yaklaşımını ele almaktayız. Çevresel modelleme gibi konularda önemli olan bu yaklaşım, bağlamsal bilgileri birleştirmek ve belirli nesne sınıflarının ilişkilerini öğrenmek için kullanılabilir. Bu nedenle, 3B ZM, karmaşık bir sahnedeki güvenilir bir sonuç elde etmek için kullanılmaktadır. Genel olarak, nesnelere sahnedeki nokta yoğunluğu değerlerine göre farklı kategorilere ayrılmaktadır; zemin, ağaç, nesne vb. Üç boyutlu ZM algoritmasında, karmaşık bir sahnenin nokta bulutlarının kümelmesi için hızlı ve düşük karmaşıklık maliyetiyle hesaplanması önerilmektedir. Üç boyutlu ZM, trinom terimlerinin (x, y, z) sayısal nesne vekselleri üzerindeki matematiksel entegrasyonu ile oluşturulan eksiksiz bir 3B geometrik alan olarak ifade edilmektedir. Geliştirilen yöntemin performansı, mevcut Zernike Moment hesaplama yöntemi ile kıyaslandığında, zamansal olarak ortalama %90 civarında bir iyileştirme sağladığı görülmektedir.*

**Anahtar Kelimeler:** 3B; Nokta Bulutu; Zernike Moment;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Nokta bulutu üretimi, geliştirilen üç boyutlu (3B) tarayıcıların modüler olması ve konumlandırma sistemlerinin iyileştirilmesi ile daha kolay hale gelmektedir (Ozbay ve Cinar, 2013). Yüksek doğruluğa sahip nokta bulutu toplama süreci genellikle araştırma, inceleme, özerk sahne arama ve nesne üretme konularındaki çalışmaların ilk adımıdır (Lalonde vd., 2007).

Nesnelerin, nokta bulutu verileri kullanılarak tespit edilmesi, uzaktan algılama çalışmalarında önemli araştırma konularından bir tanesidir. Bu çalışmalardan elde edilen nitelikli sonuçlar, görselleştirme ve benzetim gibi uygulamalarda, 3B nesne modelleri oluşturmak için kullanılmaktadır. Kinect sensör kamera, sahnelerin 3B nokta bulutlarını basit ve pratik bir şekilde taramak için kullanılabilir en uygun cihazlardan bir tanesidir. Taranan sahnelerin nokta bulutlarının voksel yapısı üzerinde bir dizi işlem yerine getirilen birçok yeni çalışma ortaya konmaktadır (Özbay ve Çınar, 2018). Bu çalışmada, bir sahnenin Kinect tarafından elde edilen 3B nokta bulutlarından 3B Zernike Moment'leri (ZM) etkili ve hızlı bir şekilde hesaplayan bir yaklaşım önerilmektedir. Bununla birlikte, bu son derece güvenilir nokta etiketleme yaklaşımı, sahnedeki nesne sınıflarının (örneğin, nesnelere, ağaçlar ve yollar) ve karmaşık nesne yapısının değişkenliği nedeniyle zor bir işittir. Bu bakımdan, ZM kullanılarak aynı sahnedeki birden fazla nesneyi ayırt etmek için bağlamsal bir kümelenme işlemi yerine getirilebilmektedir.

Momentler, bilgisayarla görme, görüntü işleme, görüntü tanıma ve çok işlevli analiz konuları gibi birçok çalışmada kullanılmaktadır. Bu çalışmaların bazılarında, ortogonal polinomlara dayanan ZM kullanılmıştır (Teague, 1980). Bu nedenle, bu çalışmada vokseller üzerinde çalışabilen 3B Zernike Moment yaklaşımı 3B şekil tanımlayıcıları için savunulmaktadır. Önerilen yöntemin asıl amacı, şekil özelliklerini etkin ve başarılı bir şekilde ayırıştırma yoluyla bir sahneyi hiyerarşik nokta bulutlarından

soyutlamaktır. Bu çerçevede, sahnedeki her küçük veya büyük nesneye ait nokta bulutları sınıflandırılabilir. Önerilen yaklaşımla elde edilen 3B ZM kullanılarak bu sonucun sahne içerisindeki hangi nesne sınıfına ait olduğu belirlenebilmektedir.

## Materyal ve Yöntem

3B nesnelerin yeniden inşası, sınıflandırılması, bölümlendirilmesi, kümelenmesi ve tanınması, özellikle son yıllarda yapılan önemli araştırma konularındandır. Bu alandaki çalışmalar, 3B nesne şekli tanımlayıcıları olarak 3B Moment değişmezlerinin (invariants) yeteneklerinden faydalanmıştır (Funkhouser vd., 2003). 2B ZM, bilgisayarlı grafik alanlarından kenar çıkarma (Ying-Dong vd., 2005), görüntü alma (Kim vd., 2008), tanıma uygulamaları (Broumandnia vd., 2007) ve biyometri (Kim vd., 2008) gibi çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Klasik 2B Zernike polinomlar, ortogonal olmayan momentleri 3B yaparak, ortogonal olarak güçlendirilmesini amaçlamaktadır. Bazı çalışmalarda ise, momentlerin ve 3B Zernike polinomlarının türetilmesinin teorik yönleri halen tartışılmaktadır (Canterakis, 1999).

3B ZM grubunun nokta bulutu üzerinden yeniden yapılandırılması basit ve etkili bir işlemdir. Ek olarak, 3B ZM, kapalı sınırlar belirlemeye gerek kalmadan nesnelerin 3B şekilleri hakkında küresel bilgi toplama yeteneğine sahiptir. Bu bakımdan nesnelere ait şekil bilgisi ve bunlarla ilgili analiz teknikleri geliştirilerek 3B nesnelerin yapı ve fonksiyon ilişkileri hakkında bilgi üretimi açısından önemlidir.

## Nokta Bulutu Üretimi

Bu makalede Microsoft Kinect Sensör kullanılarak Visual Studio C# ortamında 3B nokta bulutlarının yakalanmasını sağlayan bir veri toplama modülü geliştirilmiştir. Bu sistem, nesne algılamada kullanılmak üzere üç boyutlu sahneler üretmek ve bu sahneler içerisindeki nesne modellerini tespit etmek için kullanılabilir. Geliştirilen sistemde kurulu olan Kinect sensörüne bağlanmak için

OpenNI kütüphanesi, yazılıma dahil edilmiştir (Ozbay ve Cinar, 2013). Ortalama 1,5 m mesafeden çekilen görüntülerden elde edilen 3B nokta bulutları, bu uygulama için Nokta Bulut Kütüphanesi (PCL) tarafından sunulan basit nokta bulut verilerine (PCD) dönüştürülmektedir. Bu formattaki veri türünde üretilen her satır için 3B nokta bilgilerini (x, y, z) tutan standart bir Ascii metin dosyası oluşturulmaktadır. Nokta bulutu verileri, 3B nesnelere oluşturulan bulutları işaretlemek için zemin ve arka plan çıkarma gibi basit ön hesaplamalar ile birlikte gürültüsüz hale getirilmektedir. Şekil 1'de Kinect sensör kamera kullanarak beş farklı nesneye ait 3B nokta bulutu üretme düzeneği gösterilmektedir. Şekilde gösterilen nesnelerin üretilen nokta bulutu sayıları soldan sağa sırasıyla, 230, 262, 247, 234 ve 233'dür.



Şekil 1. Kinect sensör kamera ile beş farklı nesnenin taranması

### 3B Zernike Momentlerin Hesaplanması

Klasik Zernike moment hesaplaması sırasında, nokta bulutu üzerindeki üç boyutlu Zernike polinomlar,  $Z_{l,m,n}$ , denklem (1)'deki gibi ortogonal polinomlar olarak tanımlanmaktadır (Grandison vd., 2009);

$$Z_{l,m,n}(\mathcal{R}) = R_{l,m}(r)Y_{m,n}(\theta, \phi), \quad (1)$$

Bu denklemde,  $l \in [0, \text{Max}]$ ,  $m \in [0, l]$  ve  $n \in [-m, m]$  dir. Ayrıca  $(l - m)$  pozitif değerlere sahip tamsayılardan seçilmelidir. Hesaplama işlemleri

sırasında Max, maxterm olarak tanımlanmaktadır.  $R_{l,m}(r)$  ve  $Y_{m,n}(\theta, \phi)$ , radyal fonksiyonlar ve gerçek sayısal değeri olan küresel harmonikler olarak adlandırılmaktadır. Denklem (2)'de tarif edildiği gibi, 3B Zernike,  $f(\mathcal{R})$ 'nin herhangi bir fonksiyonunun bir birim küre uzayında tanımlanan polinomları kullanarak genişletilebilmektedir;

$$f(\mathcal{R}) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{n=-m}^m \Omega_{l,m,n} Z_{l,m,n}(\mathcal{R}). \quad (2)$$

$\Omega$  denklem (2)'deki üç boyutlu ZM'yi temsil eden genişleme katsayısıdır. Daha sonra, denklem (3)'teki gibi polinomların karmaşık eşleniği üretilmektedir.

$$\Omega_{l,m,n} = \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \overline{Z_{l,m,n}(\mathcal{R})} f(\mathcal{R})(r^2 \sin\theta \, dr d\theta d\phi). \quad (3)$$

3B küresel ve kartezyen koordinatlar arasındaki dönüşüm, aşağıdaki gibi 3B Zernike polinomları ile formüle edilmektedir;

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \sin\theta \sin\phi \\ r \sin\theta \cos\phi \\ r \cos\phi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Burada, 3B Zernike polinomlar şu şekilde tanımlanmıştır:

$$Z_{l,m,n}(X) = \sum_{v=0}^k Q_{k,m,v} |X|^{2v} e_{m,n}(X), \quad (5)$$

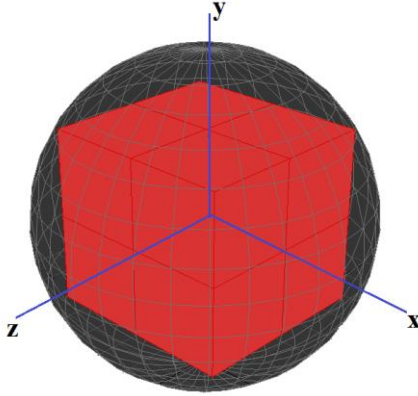
Denklem (5)'teki  $k = (l - m)/2$  değeri,  $0 \leq v \leq k$  aralığında bir tamsayı değeridir. Böylece  $Q_{k,m,v}$  katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$Q_{k,m,v} = \frac{(-1)^k}{2^{2k}} \sqrt{\frac{2m+4k+3}{3}} \binom{2k}{k} (-1)^v \frac{\binom{k}{v} \binom{2(k+m+v)+1}{2k}}{\binom{k+m+v}{k}} \quad (6)$$

3B Zernike tanımlayıcıları genellikle benzer yapıları ve bu tanımlayıcıların vektörlerini karşılaştırmak için kullanılırken, bağımsız 3B ZM görüntü rekonstrüksiyonu için kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen algorithmda, Kinect sensör kameradan elde edilen görüntülerden üretilen nokta bulutunun voksel yapısı ile üç boyutlu ZM hesaplanmaktadır.

### Güçlü 3B Zernike Hesaplaması

Nesnelerin veya sayısal görüntülerin ZM'i, üç boyutlu Zernike polinomlarına yansıyan değerler olarak ifade edilmektedir. Bu polinomlar, küresel koordinatlarda tanımlanan her birim kürede / vokselde bulunmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, küresel koordinat sistemine göre, birim küre,  $x$ ,  $y$  ve  $z$  eksenleri gösterilen sekiz küçük eşit küp voksele bölünmüştür.



Şekil 2. Sekiz voksel barından bir birim küpün gösterimi

Nokta bulutu veya yakalanan her 3B nesnenin dijital görüntüsü,  $N \times N \times N$  boyutlarında çok boyutlu bir voksel dizisinden oluşmaktadır. Bu voksellerin  $(x_i, y_i, z_i)$  merkez noktaları, yalnızca bir dizi ayırık noktalar kümesindeki yoğunluk işlevleri kullanılarak tanımlanmaktadır;

$$x_i = y_i = z_i = \frac{2i-N-1}{N\sqrt{3}}, \quad (7)$$

Denklem (7)'deki  $i = 1, 2, \dots, N$ 'e kadar olan  $x$ ,  $y$ , ve  $z$  boyutlarındaki örnekleme aralıkları  $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ ,  $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$ ,  $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$  dir.

Normalizasyon faktörü hesaplaması sırasında,  $C_{m,n}$  tekrarlamaya bağıntısı elde edilmektedir. Böylece, yüksek hesaplama maliyetleri asgariye indirilmektedir.

$$C_{m,n} = \frac{\sqrt{(2m+1)(m+n)!(m-n)!}}{m!} \quad (8)$$

Denklem (8)'e göre  $C_{m,n}$  bir normalizasyon faktörüdür ve  $\hat{z} = \sqrt{-1}$ ,  $z = x + \hat{z}y$ , tekrarlamaya ilişkileri için türetilen karmaşık değişkendir;

$$C_{0,0} = 1, \quad C_{m,0} = \sqrt{2m+1}, \quad C_{m,n} = \sqrt{\frac{m+n}{m-n+1}} C_{m,n-1}, \quad (9)$$

buradaki  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  (en yüksek değer) ve  $n = 1, 2, 3, \dots, m$  dir. ZM'lerin hesaplanmasındaki aşırı karmaşıklık, denklemde (6)  $Q_{k,m,v}$  katsayıları ile ifade edilmiştir. Daha basitleştirilmekte olan bu durum karmaşıklık sorununun üstesinden gelmek için aşağıda belirtilmektedir.

$$Q_{k,m,v} = \frac{(-1)^k}{2^{2k}} \sqrt{\frac{2m+4k+3}{3}} T_{k,m,v}, \quad T_{k,m,v} = \frac{\binom{2k}{k} \binom{k}{v} (2(k+m+v)+1)}{\binom{k+m+v}{k}}. \quad (10)$$

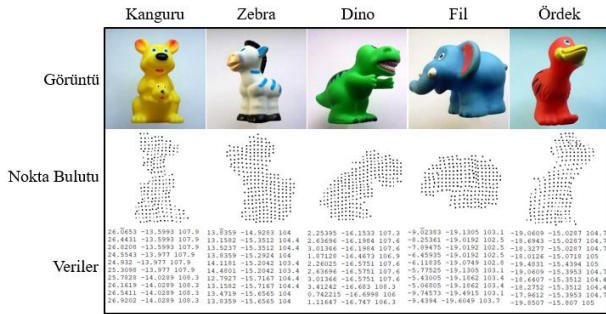
3B görüntü rekonstrüksiyonunun hesaplanmasında sıra,  $m = l$  olduğunda maksimum bağımsız moment sayısı 120 olmakta ve bu değer için maksimum sıra 9 olmaktadır.

Denklem (10)'daki matrisin kayıtlı değerleri kullanılarak, kombinasyon terimleri kolayca hesaplanabilmektedir. Moment değerleri;  $l \in [0, Max]$ ,  $m \in [0, l]$  ve  $k$ , ön hesaplama, stoklama ve gerektiğinde geri çağırma için  $T_{k,m,v}$  katsayılarının birer tamsayı değerleridir. Sonuç olarak,  $Q_{k,m,v}$  katsayıları, daha az maliyet ve daha yüksek verimlilik elde edilerek herhangi bir kombinasyon olmadan etkili bir şekilde hesaplanabilmektedir. Bu şekilde, aşırı hesaplama karmaşıklığı ortadan kalkmaktadır. Burada özellikle,  $m = l$  şartı için gerçekleşen özel durum için,  $Q_{k,m,v}$  katsayıları, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$Q_{0,m,0} = \sqrt{\frac{2m+3}{3}} \quad (11)$$

Geometrik 3B ZM'nin hesaplanmasının karmaşıklığı önerilen ardışık hesaplama yöntemiyle büyük ölçüde azaltılmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi, şekildeki sekiz küpü içeren birim küreden, küçük bir küp hesaplama için çıkarılır ve bu birinci alt küpü ifade etmektedir. Bu nedenle, bir şeklin 3B ZM hesaplaması tüm

nesne alanının sadece sekizde biri için yeterli olacağı anlamına gelmektedir. Yöntemin bu özelliğini uygulayarak, hesaplama maliyetleri % 12,5'a kadar yani 8'de 1'i oranında düşürülebilmektedir. Bununla ilgili ayrıntılı bilgi, Tablo 1'deki sayısal sonuçlar Şekil 4'te grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu çalışmada, C# programlama dili, geliştirilen algoritmayı uygulamak ve gerekli olan veri toplama işlemi için Kinect sensör kamera ile birlikte kullanılmıştır. ZM'nin hesaplanması sürecinde Matlab 9.4 kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan bilgisayar donanım özellikleri Intel Core i7-3610QM CPU, 8 GB RAM, GeForce 650 M grafik kartıdır.



Şekil 3. Nokta bulutu üzerinden 3B Zernike momentleri hesaplanan veriler

## Uygulama ve Başarımlar

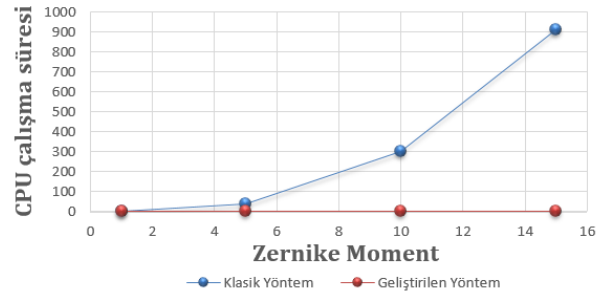
**Tablo 1.** Bilinen (Novotni ve Klein, 2004) ve önerilen Zernike Moment hesaplama sürelerinin CPU çalışma zamanlarına göre azaltım oranı (Dino).

ZM SIRASI	BİLİLEN ZM (NOVOTNI)	ÖNERİLEN ZM	AZALTIM ORANI %
1	0.635	0.075	88.189%
5	37.498	0.199	99.469%
10	303.180	0.368	99.878%
15	913.280	1.096	99.880%

Bu makalede Kinect sensör kamera kullanarak elde edilen nokta bulutu verileri üzerinden üç boyutlu Zernike Momentlerin hesaplanması için beş farklı veri seti ile çalışılmıştır. Şekil 3'te elde edilen verilere ait 2B görüntüler, oluşturulan nokta bulutu gösterimi ve her bir veri seti için  $x$ ,  $y$ ,  $z$  sayısal verileri gösterilmektedir. Tüm veri setleri ortalama aynı büyüklüğe sahip nesnelere oluşturulduğundan ve aynı mesafeden yakalandığından nokta bulutu sayıları yaklaşık

olarak eşittir. Bu bakımdan CPU çalışma zamanı azaltım oranları her bir set için aynı değerde sonuçlanmıştır.

Önerilen yöntemin, işlem zamanının en düşük moment sırası için yaklaşık % 88 ve en yüksek moment sırası için % 99 olduğu, bilinen ZM hesaplama yönteminden daha verimli olduğu açıkça gösterilmiştir. Dahası, mevcut bilinen yöntemlerde hiçbir hafıza tasarrufu yoktur. Genel olarak, bu karşılaştırma önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermektedir. Bu değerlendirmeler, Kinect kullanarak elde ettiğimiz Dino nesnesi üzerinden sağlanmıştır. Bunun haricinde 4 farklı nesne için de aynı çalışma yürütülmüş ve nokta sayısına bağlı olarak, hem CPU çalışma süresi hem de ZM hesabı olarak yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. Dino nesnesi için 3B ZM'in hesaplanmasında, CPU çalışma süreleri grafiği

## Sonuçlar

Niteliksel ve niceliksel değerlendirmeler, önerilen hızlı ZM hesaplama yöntemi kullanılarak nokta bulutlarından etkili bir şekilde nesne tespitine faydalı olacak sonuçlar elde edilebileceği yönündedir. Uygulanan yöntemin etkinliğini doğrulamak için taranan bir sahnedeki beş farklı nesne için yapılmıştır. Sahnedeki nesnelere taranması için Kinect'in yeteneklerinden faydalanılmıştır. Sahnedeki nesnelere, farklı yapıdaki beş küçük plastik oyuncaktan (kanguru, zebra, dino, fil, ördek) oluşmaktadır. Nokta bulutları, tek bir tarama kullanarak herhangi bir tıkanıklık olmadan elde edilmiştir. ZM hesaplamaları zemin ve arka plan nokta bulutlarından soyutlanarak doğrudan nesnelere ait olan veriler üzerinde yürütülmüştür.



## **Kaynaklar**

- Broumandnia, A., Shanbehzadeh, J. (2007). Fast Zernike wavelet moments for Farsi character recognition. *Image and Vision Computing*, 25(5), 717-726.
- Canterakis, N. (1999). 3D Zernike moments and Zernike affine invariants for 3D image analysis and recognition. In *In 11th Scandinavian Conf. on Image Analysis*.
- Funkhouser, T., Min, P., Kazhdan, M., Chen, J., Halderman, A., Dobkin, D., Jacobs, D. (2003). A search engine for 3D models. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(1), 83-105.
- Grandison, S., Roberts, C., Morris, R. J. (2009). The application of 3D Zernike moments for the description of “model-free” molecular structure, functional motion, and structural reliability. *Journal of Computational Biology*, 16(3), 487-500.
- Kim, H. J., Kim, W. Y. (2008). Eye detection in facial images using Zernike moments with SVM. *ETRI journal*, 30(2), 335-337.
- Kim, W. C., Song, J. Y., Kim, S. W., Park, S. (2008). Image retrieval model based on weighted visual features determined by relevance feedback. *Information Sciences*, 178(22), 4301-4313.
- Lalonde, J. F., Vandapel, N., Hebert, M. (2007). Data structures for efficient dynamic processing in 3-d. *The International Journal of Robotics Research*, 26(8), 777-796.
- Novotni, M., Klein, R. (2004). Shape retrieval using 3D Zernike descriptors. *Computer-Aided Design*, 36(11), 1047-1062.
- Ozbay, E., Cinar, A. (2013). 3D reconstruction technique with kinect and point cloud computing. *Global Journal on Technology*, 3, 1748-1754.
- Özbay, E., Çinar, A. (2018). A voxelize structured refinement method for registration of point clouds from Kinect sensors. *Engineering Science and Technology, an International Journal*.
- Teague, M. R. (1980). Image analysis via the general theory of moments. *JOSA*, 70(8), 920-930.
- Ying-Dong, Q., Cheng-Song, C., San-Ben, C., Jin-Quan, L. (2005). A fast subpixel edge detection method using Sobel–Zernike moments operator. *Image and Vision Computing*, 23(1), 11-17.

## A Robust Calculation of 3D Zernike Moments from Point Clouds

### Extended Abstract

*In this study, we discuss the approach of the efficient calculation of Zernike Moments (ZM) over a three-dimensional (3D) point cloud. This approach, which is important in environmental modeling, can be used to combine contextual information and to learn the relationships of particular object classes. Therefore, 3D Zernike Moment is used to obtain a reliable result from a complex scene. In general, objects are categorized into different categories according to the dot density values in the scene; ground, tree, object etc. In a three-dimensional Zernike Moment algorithm, it is recommended to calculate a complex scene with fast and low complexity cost for clustering of point clouds. Three-dimensional Zernike Moment is expressed as a complete 3D geometric field created by the mathematical integration of trinomial terms ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) on numerical object voxels. The performance of the developed method, compared with the current Zernike Moment calculation method, shows an improvement of 90% on average.*

*Zernike Moments are calculated in the whole image and can give successful results in object recognition and identification. However, Zernike Moment is not equally successful in subjects such as an object classification, where image information is more important than image. For this reason, instead of calculating the moments on the whole image, a new principle calculation of point cloud Zernike Moment around each and every neighbor was used. This method produces faster and more effective results than the common Zernike calculation methods.*

*The voxel data of a scene is expressed as a point cloud distributed in a three-dimensional space according to a particular order. In this article, a new method is proposed which reflects the formal properties of point distributions for Moment calculations of voxel distribution.*

*The moments of a point set may express the formal characteristics of the distribution of this cluster, such as the center of gravity, variance, skewness, and kurtosis. In this case, voxel data can also be considered as a set of points and the formal properties of its distribution can be evaluated over the moments. As a result, the results of 3D voxel data*

*can be followed by using a parsing result of object classification.*

*Zernike Moment is independent of the rotational movements on the images of objects and is a commonly used tool in the fields of shape recognition and classification. Similarly, the amplitudes of 3D Zernike Moments use this feature in three-dimensional image structures. With the help of sensor cameras, which have become widespread in recent years, it has become possible to take three-dimensional images of various scenes. In this study, three-dimensional object images within a scene, a new method to help object classification with the robust 3D Zernike Moment calculation approach is proposed. The proposed method was applied to the dataset of real 3D toy objects using the Kinect sensor camera. 3D Zernike Moment results from data sets are produced faster and more efficiently than known Zernike calculation methods.*

**Keywords:** 3D; Point Cloud; Zernike Moment



# Kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümü için atom arama optimizasyon algoritması

**Erdal EKER\***

Muş Alparslan Üniversitesi, Pazarlama ve Reklamcılık Bölümü, Muş  
[erdaleker4965@gmail.com](mailto:erdaleker4965@gmail.com) ORCID: 0000-0002-5470-8384, Tel: (507) 696 63 26

**Murat KAYRI**

Batman Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Batman  
[murat.kayri@batman.edu.tr](mailto:murat.kayri@batman.edu.tr) ORCID: 0000-0002-5933-6444

**Serdar EKİNCİ**

Batman Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Batman  
[serdar.ekinci@batman.edu.tr](mailto:serdar.ekinci@batman.edu.tr) ORCID: 0000-0002-7673-2553

Geliş: 15.03.2019, Revizyon:05.04.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

## Öz

Son yıllarda evrim, fizik, matematik ve sürü ilhamlı çok sayıdaki sezgisel-üstü optimizasyon teknikleri, bilim ve mühendislik alanlarına önerildi. Atom arama optimizasyonu (ASO), temel moleküler dinamiklerden esinlenen popülasyon tabanlı yeni bir optimizasyon algoritmasıdır. ASO, basitliği ve az sayıda kontrol parametresi sayesinde optimizasyon problemlerine kolaylıkla uygulanabilir. ASO, en çok bilinen sekiz test fonksiyonuna (Sphere, Rosenbrock, Step, Schwefel, Rastrigin, Ackley, Griewank ve Egg Crate) uygulandı. Ayrıca, her test fonksiyonu için ASO ile elde edilen istatistiksel sonuçlar (ortalama, standart sapma ve en iyi değer) literatürdeki diğer algoritmalarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), yapay arı kolonisi (ABC) ve sinüs kosinüs algoritması (SCA) karşılaştırma için seçilen diğer metotlardır. Tüm test fonksiyonları için elde edilen istatistiksel sonuçlar ve yakınsama hızlarına bakıldığında, ASO algoritmasının kısıtlı optimizasyon problemlerini çözmedeki üstün performansı göze çarpmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Atom arama optimizasyonu; sezgisel-üstü; optimizasyon, test fonksiyonları.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Optimizasyon, verilen bir sistemin çıkışını eniyilemek için sistem parametrelerinin mümkün olan tüm değerler arasından optimum olanları bulma işlemini ifade eder. Optimizasyon problemleri, tüm araştırma alanlarında bulunabilir, bu da optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu kılarken bu alanda çalışan araştırmacılar için de ilgi odağı haline gelir. Geleneksel optimizasyon paradigmasının, yerel optimumda takılı kalma ve arama alanının belirlenme ihtiyacı gibi sakıncaları nedeniyle, son yirmi yılda sezgisel üstü optimizasyon yaklaşımlarına ilginin arttığı gözlenmektedir (Mirjalili, 2016b; Boussaïd vd., 2013; İkinci ve Hekimoğlu, 2019).

Sezgisel üstü eniyileme algoritmaları akıllı hesaplamalarda giderek daha yaygın hale gelerek çok sayıda gerçek mühendislik problemlerine de yaygın olarak uygulanmaktadır (İkinci ve Demiroren, 2016). Yaygın hale gelmeleri aşağıdaki yönlerinden kaynaklanmaktadır. İlk olarak, tüm bu optimizasyon tekniklerinin, gerçek hayatta bulunan ve her türlü fiziksel olay veya biyolojik davranıştan esinlenen, makul olduğu kanıtlanmış bazı temel teorileri ve matematiksel modelleri vardır (Jaddi vd., 2017). Teoriler basit ve anlaşılması kolaydır. İkincisi, optimizasyon

algoritmaları bir kara kutu gibi düşünülebilir. Bu, algoritmaların herhangi bir optimizasyon problemi için verilen bir giriş kümesi için kolaylıkla bir çıkış kümesi oluşturabildiği anlamına gelir. Araştırmacı, daha iyi çözümler elde etmek için algoritmaların yapılarını ve parametrelerini değiştirebildiğinden çok esnek ve çok yönlüdürler. Üçüncüsü, sezgisel üstü algoritmalar, çoğu mühendislik problemleri çok modlu fonksiyonlar olarak kabul edildiğinden, bu problemlerin çözümünde yerel minimumlardan etkin bir şekilde sakınmak gibi çok değerli bir özelliğe sahiptir. Ek olarak, makul bir süre içinde çözümlerin doğruluğunu artırmak için diğer algoritmaların iyi yanları kullanılarak farklı versiyonları geliştirilebilir. Dördüncüsü, sezgisel-üstü optimizasyon algoritmaları, tek amaçlı ve çok amaçlı problemler, düşük boyutlu ve yüksek boyutlu problemler, tek modlu ve çok modlu problemler ile ayrık ve sürekli problemler dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere farklı türde problemlerle başa çıkabilir (Zhao vd., 2019a). Literatürdeki bazı sezgisel üstü optimizasyon algoritmalarına örnekler Tablo 1'de gösterilmiştir. Sezgisel-üstü algoritmalar veri madenciliği, zamanlama ve çizelgeleme, örüntü tanıma, endüstri, mühendislik ve ekonomi gibi birçok alanda uygulanmışlardır (Jaddi vd., 2017; İkinci ve Hekimoğlu, 2017).

**Tablo 1.** Doğadan ilham alan optimizasyon algoritmaları hakkında kısa literatür taraması

Algoritma	Esin Kaynağı
Genetik algoritma (GA) (Holland, 1975)	Evrin
Benzetilmiş tavlama (SA) (Kirkpatrick vd., 1983)	Metalürjideki tavlama süreci
Parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Eberhart ve Kennedy, 1995)	Kuş sürülerinin sosyal davranış zekâsı
Yapay arı kolonisi (ABC) (Basturk ve Karaboga, 2006)	Bal arıları
Ateşböceği algoritması (FA) (Yang, 2009)	Ateşböceklerinin sosyal davranışları
Yerçekimsel arama algoritması (GSA) (Rashedi vd., 2009)	Yerçekimi kanunu ve kütle etkileşimleri
Yarasa algoritması (BA) (Yang, 2010)	Yarasaların yankı ile yer tayin davranışları
Çiçek tozlaşma algoritması (FPA) (Yang, 2012)	Çiçekli türlerin döllenme için tozlaşma süreci
Krill sürüsü (KH) (Gandomi ve Alavi, 2012)	Krill bireylerin doğadaki sürü davranışları
Yusufçuk algoritması (DA) (Mirjalili, 2016a)	Yusufçukların statik ve dinamik sürü davranışları
Karınca aslanı optimizasyonu (ALO) (Mirjalili, 2015)	Karınca aslanlarının doğadaki avlanma mekanizması
Virüs kolonisi arama (VCS) (Li vd., 2016)	Virüs enfeksiyonu ve yayılma stratejileri
Balina optimizasyon algoritması (WOA) (Mirjalili ve Lewis, 2016)	Kambur balinaların sosyal davranışları
Sinüs kosinüs algoritması (SCA) (Mirjalili, 2016b)	Matematiksel fonksiyonlara dayalı model
Çekirge optimizasyon algoritması (GOA) (Saremi vd., 2017)	Çekirgelerin sürü davranışları
Böbrek-ilhamlı algoritma (KA) (Jaddi vd., 2017)	İnsan vücudundaki böbreklerin çalışma süreci
Sincap arama algoritması (SSA) (Jain vd., 2019)	Sincapların dinamik besin arama davranışı
Atom arama optimizasyonu (ASO) (Zhao vd., 2019a)	Temel moleküler dinamikler

Tablo 1’de verilen PSO ve ABC, sezgisel-üstü algoritmalar içerisinde üzerinde en çok çalışılan tekniklerdir. Bununla birlikte SCA, yeni bir algoritma olmasına rağmen basit ve karmaşık optimizasyon problemlerinde en çok tercih edilen tekniktir. ASO ise en güncel ve etkili algoritmalarından biridir ancak mühendislik ve diğer bilim dallarındaki uygulamaları neredeyse yoktur. Bu çalışmada, PSO, ABC, SCA ve ASO algoritmalarının performansları bazı test fonksiyonları ele alınarak uygun şekilde karşılaştırılacaktır ve başarımları oranları belirlenecektir.

## PSO, ABC, SCA ve ASO Algoritmalarına Genel Bakış

### Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilen PSO, sürü davranışı gösteren kuş ve balık sürüleri dikkate alınarak oluşturulan stokastik bir optimizasyon metodudur. Bu metot birkaç yönden genetik algoritmaya (GA) benzemesine rağmen herhangi bir evrim operatörü yoktur. Popülasyon, sürü olarak adlandırılır ve parçacıklardan (bireylerden) oluşur. Parçacıklar optimize edilen fonksiyonun  $D$  boyutlu uzayında hareket ederler. Konum ve hız vektörleri sırasıyla  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$  ve  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$  olarak ifade edilir (Eberhart ve Kennedy, 1995).

Her bir parçacık kendi en iyi konumuna ( $pbest$ ) ve tüm kümenin en iyi konumuna ( $gbest$ ) bağlı olarak konumunu ve hızını günceller. Her bir adımda en iyi iki değerini bulduktan sonra aşağıdaki eşitliğe göre kendisini günceller (Eberhart ve Kennedy, 1995; Ekinci, 2016).

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^t + c_1 * r_1 * (pbest_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 * r_2 * (gbest_d^t - x_{id}^t) \quad (1)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, NP$  olup  $NP$  sürünün büyüklüğünü,  $w$  her bir iterasyon için atalet ağırlığının doğrusal azalışını,  $c_1$  ve  $c_2$  sırasıyla bilişsel ve sosyal bileşenlerin göreceli etkisini belirleyen öğrenme faktörleridir.  $r_1$  ve  $r_2$ ,  $[0,1]$  aralığındaki

herhangi rasgele sayılardır.  $x_{id}^t$ ,  $v_{id}^t$ ,  $pbest_{id}^t$  sırasıyla  $i$ . parçacığın  $t$ . iterasyonu için  $d$ . boyuttaki konum, hız ve kişisel en iyisidir. Aynı koşullarda tüm sürünün en iyi parçacığı ise  $gbest_d^t$ ’dir. Bu çalışmada,  $c_1$  ve  $c_2$  öğrenme faktörleri 2.0 olarak alınmıştır.

### Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması

Basturk ve Karaboga (2006) tarafından bal arılarının besin arama davranışlarından esinlenerek geliştirilen ABC algoritması, iki grup arıdan oluşur. Koloninin ilk yarısı yapay işçi arılardan ikinci yarısı ise gözcü arılardan oluşur. Besin kaynağı miktarınca işçi arı olur. Gözcü arılar arama bölgesinde işçi arıların besin kaynağı ile ilgili bilgiyi paylaşırlar. Birkaç döngü sonucunda besin kaynağı iyileştirilmezse kâşif arılar yeni besin kaynakları için rastgele araştırmalar yaparlar. Bir besin kaynağının konumu, optimizasyon probleminde olası bir çözümü temsil eder. Kaynaktaki besin miktarı ise ilgili çözümün uygunluğunu gösterir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir (Basturk ve Karaboga, 2006; Ekinci ve Demiroren, 2016).

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1+fit_i} & \text{eğer } fit_i \geq 0 \\ 1 + abs(fit_i) & \text{eğer } fit_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Bir gözcü arı, işçi arının tüm olası çözümleri arasından en uygun değeri seçer ve bu da aşağıdaki gibi ifade edilir (Basturk ve Karaboga, 2006).

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{SN} fit_n} \quad (4)$$

Son eşitlikte  $SN$  işçi arı sayısına eşit olan besin kaynağı sayısını vermektedir. ABC hafızasındaki eski yiyecek kaynaklarından birini düzenlemek için aşağıdaki eşitlikten yararlanır (Basturk ve Karaboga, 2006; Ekinci, 2016).

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5)$$

Eşitlik (5)’te  $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$  ve  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ,  $x_{kj}$ ,  $x_{ij}$ ’den farklı seçilen rasgele bir çözümü ifade ederken  $v_{ij}$  yeni çözümü,  $\phi_{ij}$ ,  $[-1,1]$  aralığında rasgele bir sayıyı ve  $D$  ise

optimizasyon parametresinin sayısını göstermektedir.

ABC algoritmasında bir besin kaynağı daha önceki iterasyonlardan daha fazla gelişme kaydetmiyorsa o besin kaynağının terk edilmesi gerekir. ABC algoritmasında önceki iterasyon sayısı önemli bir kontrol parametresidir. Kaşif arılar, aşağıdaki eşitlik vasıtasıyla işçi arıların terk ettiği besin kaynaklarının yerine yenilerini üretmek için yönlendirilirler (Basturk ve Karaboga, 2006).

$$x_{ij} = x_{min,j} + rand(0,1)(x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (6)$$

Son eşitlikte  $x_{max,j}$  ve  $x_{min,j}$  sırasıyla  $j$ . optimizasyon değişkenlerinin üst ve alt sınırlarıdır.  $rand(0,1)$  ise  $[0,1]$  aralığındaki rasgele dağılmış bir sayıyı ifade etmektedir.

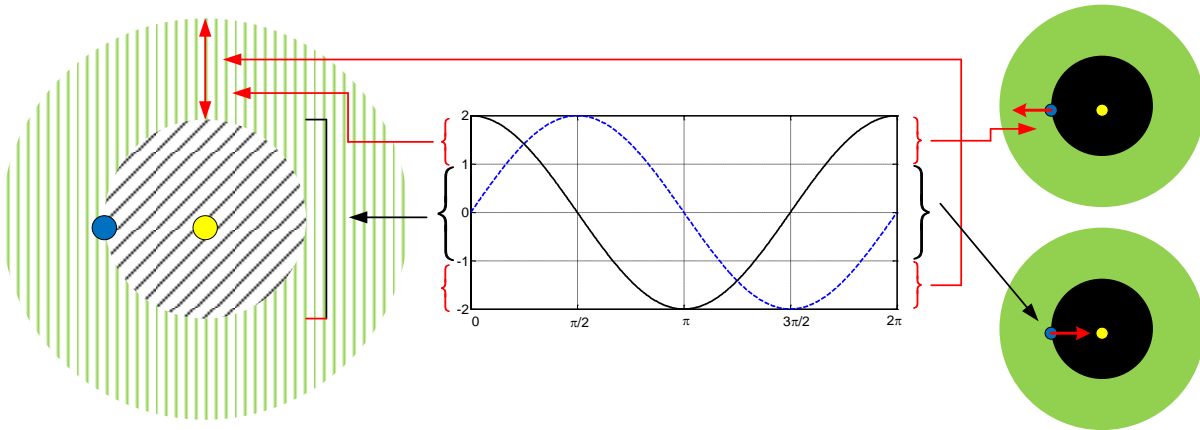
### Sinüs Kosinüs Algoritması (SCA)

SCA, Mirjalili (2016b) tarafından geliştirilen trigonometrik fonksiyonlara dayalı sezgisel-üstü bir algoritmadır. SCA, başlangıçta çoklu rasgele çözümler üretir sonra en iyi çözüme doğru ya da onun dışına doğru salınım oluşturur. Ayrıca, araştırma uzayının keşfi ve sömürülmesi için birkaç rasgele ve uyarlanabilir değişkeni

algoritmaya ekler. Keşif ve sömürme stokastik temelli optimizasyon sürecinin en çok kullanılan iki aşamasıdır ve SCA içinde aşağıdaki denklem geliştirilmiştir (Mirjalili, 2016b; Hekimoğlu, 2019a).

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} X_i^t + r_1 \cdot \sin(r_2) \cdot |r_3 P_i^t - X_i^t|, & r_4 < 0,5 \\ X_i^t + r_1 \cdot \cos(r_2) \cdot |r_3 P_i^t - X_i^t|, & r_4 \geq 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

Eşitlik (7)'de  $t$ . iterasyondaki  $i$ . boyutta  $X_i^t$  güncel çözüm pozisyonunu,  $P_i^t$  hedef noktasının boyutunu ve  $|\cdot|$  mutlak değeri ifade eder.  $[-2,2]$  değer aralığına sahip olan  $r_1$ , bir sonraki konum bölgesini tanımlar.  $[0,2\pi]$  değer aralığına sahip olan  $r_2$  ise hareketin hedef noktasına veya onun uzağına ne kadar mesafede olduğunu hesaplar.  $r_3$  hedef için rasgele bir ağırlığı temsil eder ve  $r_3 > 1$  ise hedef noktasının mesafe belirlemede değerini stokastik olarak arttırırken,  $r_3 < 1$  ise azaltır.  $r_4$ ,  $[0,1]$  değer aralığına sahiptir ve sinüsten kosinüse ya da kosinüsten sinüse fonksiyonlar arası geçişi sağlar (Mirjalili, 2016b; Ekinci, 2019). Sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının Eşitlik (7)'deki sonraki konuma etkileri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının sonraki konuma etkileri (Mirjalili, 2016b)

### Atom Arama Optimizasyonu (ASO)

ASO, moleküler dinamikten esinlenen popülasyon tabanlı sezgisel-üstü bir algoritmadır (Zhao vd., 2019a). ASO'daki her bir atomun arama uzayındaki konumu, kendisinden daha ağır ya da daha hafif bir

kütleye işaret eden bir çözüme sahiptir. Popülasyondaki tüm atomlar ağır olanların hafif olanları kendine çekmesi gibi birbirini ya çekecek ya da itecektir. Daha ağır atomların hız değişimi daha yavaş olduğundan yerel uzayda daha iyi çözümler üretmelerine neden olurken

hafif atomlar daha hızlı olduğundan yeni ümit verici alanları bulmak için tüm arama uzayında tarama yaparlar. (Zhao vd., 2019b)

ASO'da her bir atom en iyi atom ile bir kovalent bağa sahiptir. Yani her bir atom en iyi atoma doğru hareket etmeye zorlanır ve  $i$ . atomun kısıdı ise aşağıdaki eşitlikte ifade edilmiştir (Zhao vd., 2019b).

$$\theta_i(t) = [|x_i(t) - x_{best}(t)|^2 - b_{i,best}^2] \quad (8)$$

burada  $x_{best}(t)$  en iyi atomun  $t$ . iterasyondaki konumu ve  $b_{i,best}^2$  en iyi atom ile  $i$ . atom arasındaki sabit bağ uzunluğudur. Dolayısıyla kısıtlama kuvveti ise aşağıdaki eşitlikteki gibidir (Zhao vd., 2019b).

$$G_i^d(t) = \lambda(t)(x_{best}^d(t) - x_i^d(t)) \quad (9)$$

burada  $\lambda(t) = \beta e^{-\frac{20t}{T}}$  Langragian çarpanıdır ve  $\beta$  ise çarpan ağırlığıdır. Bu çalışmada  $\beta$  0.2 olarak alınmıştır.  $i$ . atomun  $t$ . iterasyondaki kütlesi aşağıdaki şekilde hesaplanır (Zhao vd., 2019b).

$$M_i(t) = e^{-\frac{Fit_i(t) - Fit_{best}(t)}{Fit_{worst}(t) - Fit_{best}(t)}} \quad (10)$$

$$m_i(t) = \frac{M_i(t)}{\sum_{j=1}^N M_j(t)} \quad (11)$$

burada  $Fit_{best}(t)$  ve  $Fit_{worst}(t)$  sırasıyla  $t$ . iterasyondaki minimum ve maksimum uygunluk değerine sahip atomlardır.  $Fit_i(t)$  ise  $i$ . atomun  $t$ . iterasyondaki uygunluk değer fonksiyonudur.

Algoritmayı basitleştirmek için  $i$ . atomun  $(t+1)$ . iterasyondaki konum ve hız vektörleri de aşağıdaki gibi ifade edilir (Zhao vd., 2019a).

$$v_i^d(t+1) = rand_i^d v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (12)$$

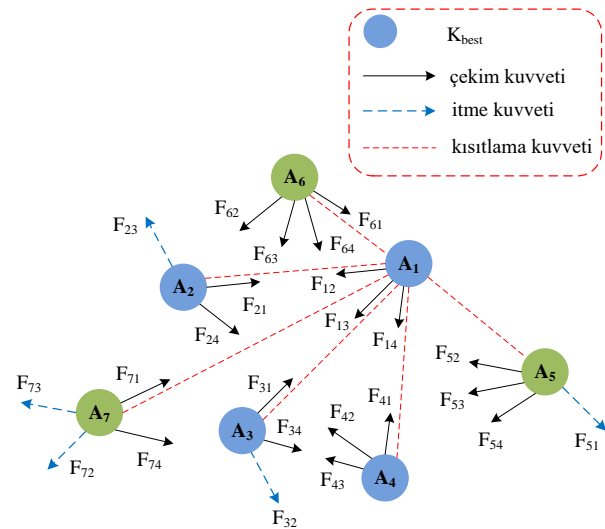
$$x_i^d(t+1) = x_i^d + v_i^d(t+1) \quad (13)$$

ASO algoritmasında, keşiflerin ilk aşamasında keşfi geliştirmek için, her bir atomun  $K$  komşuları kadar daha iyi uygunluk değerlerine sahip birçok atomla etkileşime girmesi gerektiği

gibi iterasyonların son aşamasında da sömürüyü arttırmak için, atomların  $K$  komşuları kadar daha iyi uygunluk değerlerine sahip birkaç atomla etkileşime girmeleri gerekir. Böylece, bir zaman fonksiyonu olarak  $K$ , iterasyonlar arttıkça yavaş yavaş azalır ve  $K$  aşağıdaki şekilde hesaplanır (Zhao vd., 2019b).

$$K(t) = N - (N - 2) * \sqrt{\frac{t}{T}} \quad (14)$$

burada  $N$  sistemdeki toplam atom sayısı,  $t$  mevcut iterasyon sayısı ve  $T$  ise maksimum iterasyon sayısıdır. Bir atom popülasyonunun kuvvetleri, Şekil 2'de gösterilmiştir. Burada, en iyi uygunluk değerine sahip ilk 5 atom  $K_{best}$  olarak kabul edilir. ASO'nun daha detaylı açıklamaları için Zhao vd. (2019a) ve Hekimoglu (2019b)'ye bakılabilir.



Şekil 2.  $K=5$  için  $K_{best}$  içeren bir atom sisteminin kuvvetleri (Zhao vd., 2019a)

## Test Fonksiyonları

İlgili dört sezgisel-üstü algoritmanın performanslarını test etmek için üç adet tek modlu (Sphere, Rosenbrock ve Step) ve beş adet çok modlu (Schwefel, Rastrigin, Ackley, Griewank ve Egg Crate) olmak üzere sekiz farklı test fonksiyonu ele alınmıştır. Bu test fonksiyonları Tablo 2'de özetlenmiştir. Bu fonksiyonların detaylı bilgileri Rashedi vd. (2009)'da verilmiştir.

**Tablo 2.** Tek modlu ve çok modlu bazı test fonksiyonları

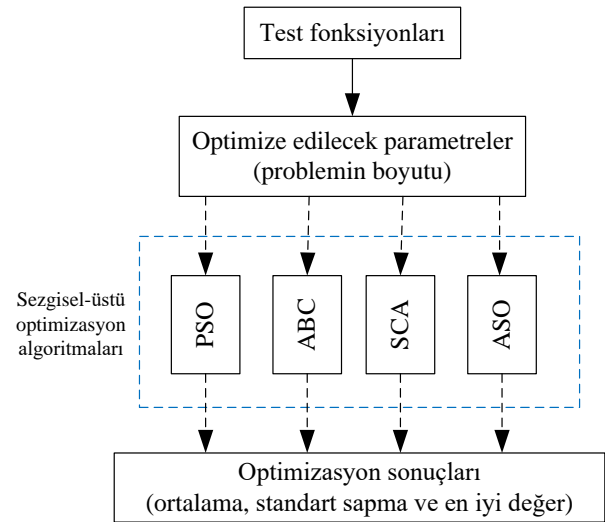
Fonksiyon	Türü	Fonksiyonu tanımı	Boyut (d)	Değer aralığı	Optimum değeri
Sphere	tek modlu	$f_1(x) = \sum_{i=1}^d x_i^2$	30	[-100, 100]	0
Rosenbrock	tek modlu	$f_2(x) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	20	[-30, 30]	0
Step	tek modlu	$f_3(x) = \sum_{i=1}^d (x_i + 0.5)^2$	30	[-100, 100]	0
Schwefel	çok modlu	$f_4(x) = -\sum_{i=1}^d (x_i \sin(\sqrt{ x_i }))$	4	[-500, 500]	-1675.9315
Rastrigin	çok modlu	$f_5(x) = \sum_{i=1}^d [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	10	[-5.12, 5.12]	0
Ackley	çok modlu	$f_6(x) = -20 \exp\left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d (\cos 2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	[-32, 32]	0
Griewank	çok modlu	$f_7(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^d x_i^2 - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	10	[-600, 600]	0
Egg Crate	çok modlu	$f_8(x) = x_1^2 + x_2^2 + 25[\sin^2(x_1) + \sin^2(x_2)]$	2	[-5, 5]	0

## Karşılaştırma Sonuçları

PSO için Yarpız Team (2019), ABC için Karaboga (2019), SCA için Mirjalili (2019) ve ASO için Zhao (2019)'deki MATLAB tabanlı kodlardan değişiklikler yapılmak suretiyle yararlanılmıştır. Bu dört algoritma en çok bilinen sekiz farklı test fonksiyonlarına uygulandı ve her bir algoritma her bir fonksiyon için 30 kez çalıştırıldı. Uygun bir kıyaslama olması bakımından her bir algoritma için popülasyon büyüklüğü 50 ve maksimum iterasyon sayısı 500 olarak seçilmiştir. Şekil 3, optimizasyon algoritmalarının test fonksiyonlarına uygulanmasını göstermektedir. Sekiz test fonksiyonu için elde edilen istatistiksel sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur. En iyi sonuçlar kalın yazı tipi ile vurgulanmıştır.

Her bir test fonksiyonu optimize edilirken, PSO, ABC, SCA ve ASO algoritmalarının çalıştırılmasıyla geçen süreler yaklaşık olarak

sırasıyla 2.419 s, 1.128 s, 0.237 s ve 2.896 s'dir.



Şekil 3. Optimizasyon aşaması

Tabloya göre, *Sphere*, *Step*, *Ackley*, *Griewank* ve *Egg Crate* test fonksiyonları için ortalama, standart sapma ve en iyi değer indeksleri açısından en iyi sonuçlar ASO algoritması ile elde edilmiştir. Benzer şekilde, *Rosenbrock* ve



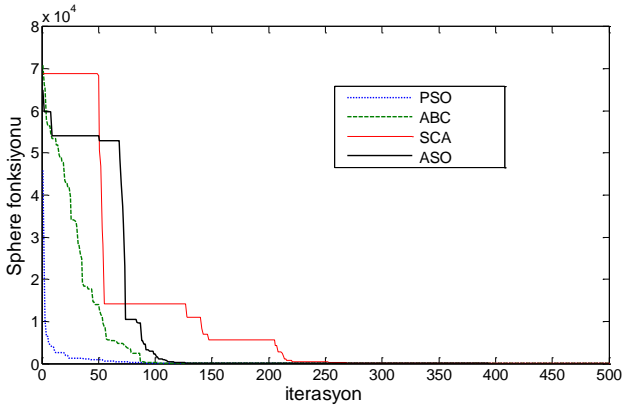
*Rastrigin* test fonksiyonları için en iyi sonuçlar ABC algoritması ile bulunmuştur. *Schwefel* test fonksiyonu için ise ABC ve ASO algoritmaları birbirine yakın sonuçlar bulmuştur.

Tüm sekiz test fonksiyonu için PSO, ABC, SCA ve ASO algoritmalarının optimizasyon ilerlemeleri (fonksiyon değerlerinin iterasyon sayılarına göre değişimleri) Şekil 4–11’de gösterilmiştir. Bu şekiller, 30 kez çalıştırılma içerisinde seçilen rastgele bir çalıştırılmadan

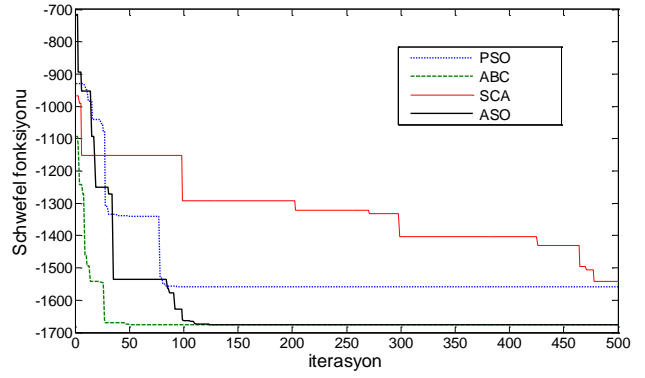
elde edilmiştir. Tablo 3’teki istatistiksel sonuçlara ve Şekil 4–11’deki yakınsama eğrilerine bakıldığında, ASO algoritmasının yeni ve etkili bir teknik olan SCA algoritmasına ve diğer iki algoritmaya (PSO ve ABC) nazaran daha üstün performansa sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, kaotik haritalar yaklaşımı veya karşıt tabanlı öğrenme stratejisi uygulanarak ASO algoritmasının verimliliği ve etkinliği daha da artırılabilir.

**Tablo 3.** Çeşitli test fonksiyonları için sonuçların karşılaştırılması

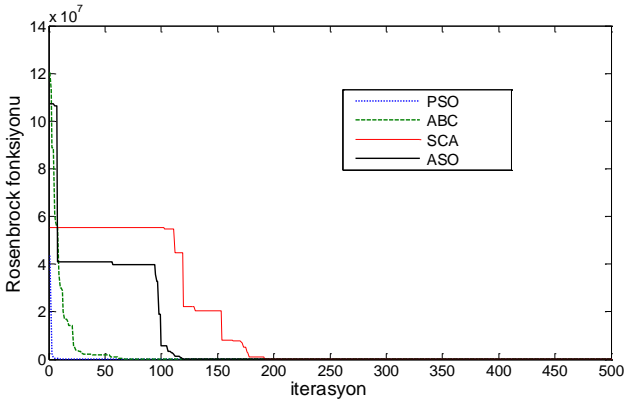
Fonksiyon Adı	İndeks	Sezgisel-üstü optimizasyon teknikleri			
		PSO	ABC	SCA	ASO
Sphere	Ortalama	4.16E-09	2.88E-05	0.259636	<b>4.55E-16</b>
	Standart sapma	8.68E-09	1.74E-05	0.283591	<b>1.75E-15</b>
	En iyi değer	8.30E-12	1.08E-05	0.004759	<b>8.00E-20</b>
Rosenbrock	Ortalama	25.65893	<b>7.458535</b>	17.49040	15.54956
	Standart sapma	21.80477	4.648221	<b>0.283592</b>	7.548646
	En iyi değer	6.323248	<b>0.578422</b>	17.60098	10.20560
Step	Ortalama	4.83E-08	0.003640	5.428303	<b>1.12E-18</b>
	Standart sapma	2.71E-07	0.016399	1.288786	<b>2.20E-18</b>
	En iyi değer	9.50E-13	6.69E-06	3.666500	<b>2.87E-20</b>
Schwefel	Ortalama	-1484.964	<b>-1675.9315</b>	-1440.078	-1615.626
	Standart sapma	88.42275	<b>0</b>	97.58904	68.76877
	En iyi değer	<b>-1675.9315</b>	<b>-1675.9315</b>	-1644.343	<b>-1675.9315</b>
Rastrigin	Ortalama	6.400986	<b>6.46E-15</b>	0.000724	5.107576
	Standart sapma	2.702742	<b>7.42E-15</b>	0.003799	2.857608
	En iyi değer	1.989976	<b>0</b>	<b>0</b>	0.995053
Ackley	Ortalama	0.000274	0.101194	7.171143	<b>5.58E-10</b>
	Standart sapma	0.001066	0.094629	9.253197	<b>3.25E-10</b>
	En iyi değer	2.88E-07	0.009319	0.018818	<b>5.34E-11</b>
Griewank	Ortalama	0.091754	0.008473	0.061780	<b>0</b>
	Standart sapma	0.042514	0.007385	0.097008	<b>0</b>
	En iyi değer	0.009901	1.86E-10	6.27E-15	<b>0</b>
Egg Crate	Ortalama	2.12E-212	3.08E-19	3.53E-77	<b>0</b>
	Standart sapma	6.38E-213	5.59E-19	5.86E-78	<b>0</b>
	En iyi değer	1.42E-215	4.54E-20	3.24E-81	<b>0</b>



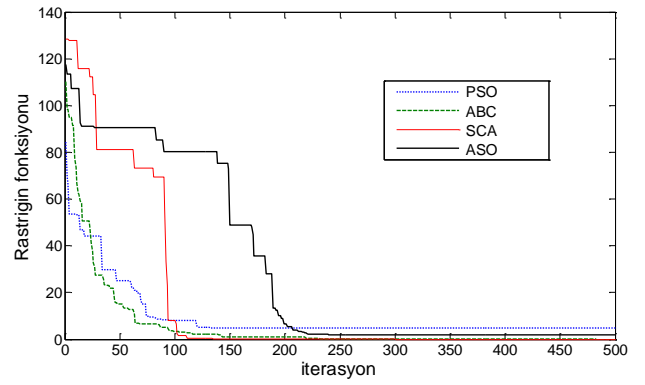
Şekil 4. Farklı algoritmalar için Sphere fonksiyonunun optimizasyon süreci



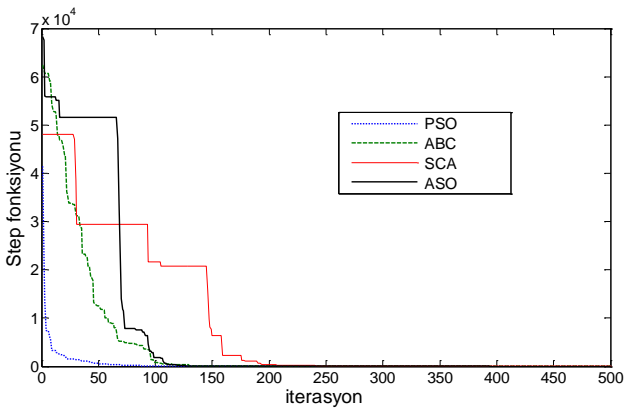
Şekil 7. Farklı algoritmalar için Schwefel fonksiyonunun optimizasyon süreci



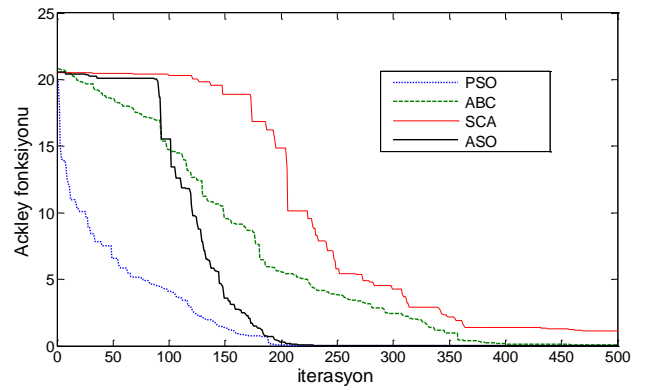
Şekil 5. Farklı algoritmalar için Rosenbrock fonksiyonunun optimizasyon süreci



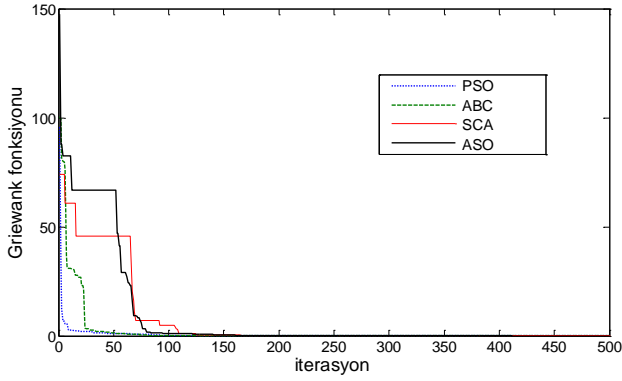
Şekil 8. Farklı algoritmalar için Rastrigin fonksiyonunun optimizasyon süreci



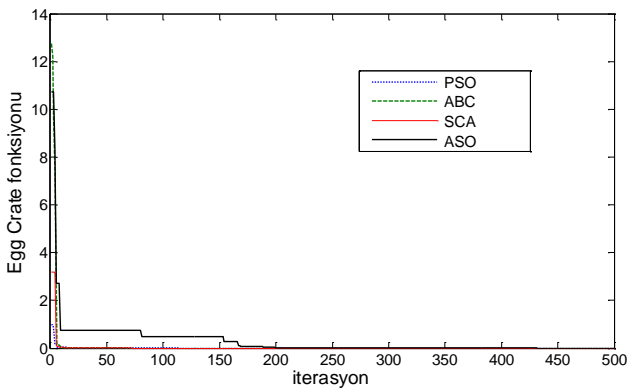
Şekil 6. Farklı algoritmalar için Step fonksiyonunun optimizasyon süreci



Şekil 9. Farklı algoritmalar için Ackley fonksiyonunun optimizasyon süreci



Şekil 10. Farklı algoritmalar için Griewank fonksiyonunun optimizasyon süreci



Şekil 11. Farklı algoritmalar için Egg Crate fonksiyonunun optimizasyon süreci

## Sonuçlar

Esinlenme kaynakları farklı olan sezgisel-üstü eniyileştirme teknikleri, çok sayıda optimizasyon problemlerine başarıyla uygulanmıştır. Kişisel bir bilgisayar üzerinden uygun koşullar altında hangisinin en iyi performansına sahip olduğu kestirilebilir. Bu çalışmada en çok bilinen ve atıf alan PSO ve ABC ile güncel algoritmalar sınıfına giren SCA ve ASO algoritmalarının karşılaştırmalı analizi yapıldı. Karşılaştırma amacı için üçü tek modlu ve beşi çok modlu olan toplam sekiz adet kısıtlı kıyaslama fonksiyonu test için kullanıldı. Elde edilen istatistiksel değerlerde (ortalama, standart sapma ve en iyi değer) ve yakınsama eğrilerinde çoğunlukla ASO algoritmasının en iyi sonuçlar verdiği anlaşılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda ise ASO algoritmasının performansını keşif ve sömürü açısından geliştirmek için kaotik haritalama önerilip yapay sinir ağlarının optimizasyonu yapılacaktır.

## Kaynaklar

- Basturk, B., Karaboga, D., (2006). An artificial bee colony (ABC) algorithm for numeric function optimization, IEEE Swarm Intelligence Symposium, Indianapolis.
- Boussaïd, I., Lepagnot, J., Siarry, P., (2013). A survey on optimization metaheuristics, *Information sciences*, 237, 82-117.
- Eberhart, R., Kennedy, J., (1995). A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, IEEE, Nagoya.
- Ekinci, S., (2016). Application and comparative performance analysis of PSO and ABC algorithms for optimal design of multi-machine power system stabilizers, *Gazi University Journal of Science*, 29(2), 323-334.
- Ekinci, S., Demiroren, A., (2016). Modeling, simulation, and optimal design of power system stabilizers using ABC algorithm, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24(3), 1532-1546.
- Ekinci, S., Hekimoğlu, B., (2017). Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(4), 1271-1285.
- Ekinci S., (2019). Optimal design of power system stabilizer using sine cosine algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, <https://dx.doi.org/10.17341/gazimmfd.460529>.
- Ekinci, S., Hekimoğlu, B., (2019). Improved Kidney-Inspired Algorithm Approach for Tuning of PID Controller in AVR System. *IEEE Access*, 7, 39935-39947.
- Gandomi, A.H., Alavi, A.H., (2012). Krill herd: a new bio-inspired optimization algorithm, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 17(12), 4831-4845.
- Hekimoğlu, B., (2019a). Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(6), 1761-1771.
- Hekimoğlu, B., (2019b). Optimal Tuning of Fractional Order PID Controller for DC Motor Speed Control via Chaotic Atom Search Optimization Algorithm. *IEEE Access*, 7, 38100-38114.
- Holland, J.H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.

- Jaddi, N.S., Alvankarian, J., Abdullah, S., (2017). Kidney-inspired algorithm for optimization problems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 42, 358-369.
- Jain, M., Singh, V., Rani, A., (2019). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Squirrel search algorithm, *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 148-175.
- Karaboga, D., Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, <https://abc.erciyes.edu.tr>, Erişim tarihi Şubat 16, 2019.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P., (1983). Optimization by simulated annealing, *Science*, 220(4598), 671-680.
- Li, M.D., Zhao, H., Weng, X.W., Han, T., (2016). A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search, *Advances in Engineering Software*, 92, 65-88.
- Mirjalili, S., (2015). The ant lion optimizer, *Advances in Engineering Software*, 83, 80-98.
- Mirjalili, S., (2016a). Dragonfly algorithm: a new meta-heuristic optimization technique for solving single-objective, discrete, and multi-objective problems, *Neural Computing and Applications*, 27(4), 1053-1073.
- Mirjalili, S., (2016b). SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems, *Knowledge-Based Systems*, 96, 120-133.
- Mirjalili, S., Lewis, A., (2016). The whale optimization algorithm, *Advances in Engineering Software*, 95, 51-67.
- Mirjalili, S., Sine Cosine Algorithm (SCA), <http://www.alimirjalili.com/SCA.html>, Erişim tarihi Şubat 18, 2019.
- Rashedi, E., Nezamabadi-Pour, H., Saryazdi, S., (2009). GSA: a gravitational search algorithm, *Information Sciences*, 179(13), 2232-2248.
- Saremi, S., Mirjalili, S., Lewis, A., (2017). Grasshopper optimisation algorithm: theory and application, *Advances in Engineering Software*, 105, 30-47.
- Yang, X.S., (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization, *International Symposium on Stochastic Algorithms*, Springer, Heidelberg.
- Yang, X.S., (2010). A new metaheuristic bat-inspired algorithm, *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, Springer, Heidelberg.
- Yang, X.S., (2012). Flower pollination algorithm for global optimization, *International Conference on Unconventional Computing and Natural Computation*, Springer, Heidelberg.
- Yarpiz Team, Particle Swarm Optimization (PSO), <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/52857-particle-swarm-optimization-psy> , Erişim tarihi Şubat 17, 2019.
- Zhao, W., Atom Search Optimization (ASO) Algorithm, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/67011-atom-search-optimization-aso-algorithm>, Erişim tarihi Şubat 21, 2019.
- Zhao, W., Wang, L., Zhang, Z., (2019a). Atom search optimization and its application to solve a hydrogeologic parameter estimation problem, *Knowledge-Based Systems*, 163, 283-304.
- Zhao, W., Wang, L., Zhang, Z., (2019b). A novel atom search optimization for dispersion coefficient estimation in groundwater, *Future Generation Computer Systems*, 91, 601-610.

## Atom search optimization algorithm for solving constrained optimization problems

### Extended abstract

Optimization refers to the process of finding optimal parameters among all possible values of system parameters to optimize the output of a given system. Optimization problems can be found in all areas of research, which in turn necessitates the development of optimization techniques and becomes the focus of interest for researchers in this field. Due to the drawbacks of traditional optimization paradigms, such as the local optimum stagnation and the need to determine the search space, the interest in meta-heuristic optimization approaches over the last two decades has increased.

Atom search optimization (ASO) is a novel population-based optimization algorithm based on basic molecular dynamics. The position of each atom in the ASO in the search space has a solution that points to a heavier or lighter mass than itself. All the atoms in the population will attract or push each other like heavy ones to attract the light ones. Since heavier atoms are slower, they produce better solutions in the search space, while light atoms are faster, so they search across the entire search space to find new promising areas. ASO can be easily applied to optimization problems thanks to its simplicity and few control parameters.

In this study, ASO was applied to eight test functions (Sphere, Rosenbrock, Step, Schwefel, Rastrigin, Ackley, Griewank and Egg Crate). In addition, the statistical results (mean, standard deviation and best value) obtained with ASO for each test function was compared with the results obtained by other algorithms in the literature. Particle swarm optimization (PSO), artificial bee colony (ABC) and sinus cosine algorithm (SCA) are the methods chosen for comparison.

PSO is a stochastic optimization method based on herd of flocks and birds. Although this method is similar to genetic algorithm (GA) in several respects, there is no evolution operator. The population is called the swarm and consists of particles (individuals). The particles move in the  $D$ -dimensional space of the optimized function.

The artificial bee colony (ABC) algorithm, which is inspired by the honey bees' foraging behavior, consists of two groups of bees. The first half of the colony consists of artificial worker bees and the second half consists of observer bees. The amount of food source becomes the number of worker bees. Observer bees share information about the food source of worker bees in the search area. If the food source is not improved after several cycles, exploratory bees do random investigations for new food sources.

Sine cosine algorithm (SCA) is a meta-heuristic algorithm based on mathematical functions. The SCA generates multiple random solutions at first, and then generates the oscillation towards or out of the best solution. In addition, several random and adaptive variables are integrated into the algorithm for the exploration and exploitation of research space. Exploration and exploitation are the two most commonly used stages of stochastic-based optimization.

For the Sphere, Step, Ackley, Griewank and Egg Crate test functions, the best results of the performance criteria such as mean, standard deviation and best value were obtained by the ASO algorithm. Similarly, the best results for Rosenbrock and Rastrigin test functions were found by ABC algorithm. For the Schwefel test function, ABC and ASO algorithms found similar results. From the obtained statistical values and convergence curves, it was found that mostly the ASO algorithm gave the best results.

However, the efficiency and effectiveness of the ASO algorithm can be further enhanced by applying a chaotic maps approach or an opposition-based learning strategy. In future studies, chaotic mapping will be proposed to improve the performance of the ASO algorithm in terms of exploration and exploitation and optimization of the artificial neural networks will be done.

**Keywords:** Atom search optimization, meta-heuristic, optimization, benchmark functions



# RSA algoritmasının şifreleme hızını arttıran algoritmalar ve performansları

Tarık YERLİKAYA\*

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Trakya Üniversitesi, 22000 Edirne  
[tarikyer@trakya.edu.tr](mailto:tarikyer@trakya.edu.tr), ORCID: 0000-0002-9888-0151, Tel: 0 (284) 226 12 17 (2215)

Canan ASLANYÜREK

Pınarhisar Meslek Yüksekokulu, Kırklareli Üniversitesi, 39000 Kırklareli  
[c.aslanyurek@klu.edu.tr](mailto:c.aslanyurek@klu.edu.tr), ORCID: 0000-0001-7513-9953, Tel: 0 288 615 33 03(5825)

Geliş: 02.05.2019, Revizyon:18.07.2019, Kabul Tarihi: 08.08.2019

## Öz

Gelişen teknoloji sayesinde ağda dolaşan veri miktarı her geçen gün biraz daha artmakta ve bu artış da verilerin korunması problemini beraberinde getirmektedir. İletişimde verilerin güvenliğinin sağlanması, doğru adrese iletilip iletilmediğinin anlaşılması için şifreleme ve dijital imza denilen çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, simetrik ve asimetrik şifreleme olarak ikiye ayrılan bu şifreleme yöntemlerinden asimetrik şifreleme yöntemi ele alınmıştır. Asimetrik şifreleme algoritmaları arasında en yaygın olarak kullanılan RSA(Rivest, Shamir, Adelman) algoritması incelenmiştir. RSA algoritması kullanılarak veriler şifrelenirken birtakım problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerden en önemlisi hız problemidir. Çünkü RSA algoritmasında şifreleme ve deşifreleme (şifre çözme) işlemleri için kullanılan matematiksel işlemlerin yoğun olması ve güvenliği arttırmak adına çok büyük asal sayılar kullanılması sebebiyle verilerin şifrelenmesi ve şifrelerin çözülmesi daha yavaş gerçekleşmektedir. Bundan dolayı RSA algoritmasının şifreleme ve şifre çözme hızını arttırmak için çeşitli algoritmalar kullanılmaktadır. Yapılan çalışma ile RSA algoritması kullanılarak yapılan şifreleme işlemlerinde karşılaşılan hız problemi ele alındı. RSA algoritmasının hızını arttıran bazı algoritmalar java programlama dili kullanılarak uygulaması yapıldı. Bu algoritmaların şifreleme işlemi yapılırken çalışma performansları ölçülüp, RSA'nın hızını arttırmadaki etkileri karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda RSA şifreleme algoritmasında kullanılan p ve q asal sayılarının boyutları 256 bit, 512 bit, 1024 bit ve 2048 bit şeklinde farklı uzunluklarda alınarak şifreleme hızına olan etkileri irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler** : Asimetrik Şifreleme, Rsa, Rsa Algoritmasında Hız,ECC, Simetrik Şifreleme

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Veri gizliliğinin insanlık için çok önemli olduğu geçmişten beri bilinmektedir. Bu yüzden de verilerin gizli kalması için geliştirilen birçok yöntem bulunmaktadır. Eskiden metindeki karakterlerin yerlerinin değiştirilmesi ve metnin şeklinin bozulması olarak gerçekleştirilen bu yöntemler, gelişen teknolojiyle daha fazla kullanıcının yararlanacağı bir şekilde bilgisayarlarla yapılan yöntemlere dönüşmüştür.

Geçmişte daha çok diplomasi ve askeri alanlarda çok önemsenen bilgi gizliliği, hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelen elektronik ticaretin kullanılmasıyla birlikte interaktif bankacılık işlemlerinin de çok yaygınlaşması ile insan hayatında çok büyük önem kazanmıştır.

Kriptoloji, Yunanca krypto's (saklı) ve logo's (kelime) sözcüklerinin birleşmesinden oluşmuş ve iletişimde gizlilik, veri bütünlüğü sağlayan şifreleme bilimi olarak değerlendirilmektedir (Rivest vd., 1978). Kriptoloji, kriptografi (şifreleme) ve kriptanaliz (şifre çözme) olmak üzere ikiye ayrılır (Yerlikaya, vd., 2007). Kriptografi, haberleşmenin güvenliğini kötü niyetli taraflara karşı korumak için yapılan çalışmalar bütünüdür (Yerlikaya, vd., 2013). Kriptanaliz var olan kriptosistemlerin analizini içeren metotlar bütünüdür. Karşı tarafa iletilmek istenen bilgi, açık mesaj (plain text) ve bu bilginin şifreli haline ise şifreli mesaj (cipher text-cryptography) olarak tanımlanır (Stallings, 1995).

Kriptografi, simetrik ve asimetrik kriptografi olarak iki gruba ayrılır. 20. yy içinde yaygın olarak kullanılan simetrik kriptografide, şifreleme ve şifre açma işlemleri için gizli anahtar adı verilen tek anahtar kullanılmaktadır (Nagar, Alshamma, 2012). Bu yöntemi kullananlar anahtar paylaşımını güvenli bir ağda yapmalıdır. Simetrik şifreleme algoritmalarına örnek olarak, Lucifer algoritmasından faydalanarak geliştirilen ve ABD tarafından FIPS olarak kabul edilen DES algoritması ve 2000'lerde geliştirilen Rijndael algoritmasını temel alarak geliştirilen AES algoritması verilebilir (Verma, Garg, 2011). Simetrik

şifreleme algoritmaları, şifreleme ve deşifreleme işlemlerini algoritma yapılarından kaynaklı olarak hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmektedir. Bununla birlikte tek anahtar ile şifreleme ve deşifreleme işlemi gerçekleştirirken anahtar güvenliğinin de sağlanması gerekir. Ayrıca şifreleme algoritmaları sadece veri güvenliğini sağlamanın yanında başka güvenlik unsurlarını (kimlik doğrulama, bütünlük vs.)da sağlaması gerekir.

Açık anahtarlı kriptosistem olarak adlandırılan asimetrik kriptografide genel ve özel anahtar olarak adlandırılan iki farklı anahtar kullanılır. Asimetrik şifreleme algoritmaları çözülmesi zor matematik problemleri.(Asal çarpanlarına ayırma ve Ayrık Logaritma) üzerine kurulmuştur. Şifreleme işlemi yapılırken genel anahtar, deşifreleme işleminde ise özel anahtar kullanılır. Böylelikle anahtar güvenliği sağlanmış olur. Herkes tarafından bilinen genel anahtar ile şifrelenmiş olan metni açamaz. Çünkü kullanılan anahtar uzunluğuna bağlı olarak genel anahtardan özel anahtarı elde etmek zordur.

Asimetrik şifreleme algoritmalarından en önemlisi, günümüz teknolojisinde de kullanılan ve 1977 yılında R. Rivest, A. Shamir ve L. Adleman tarafından oluşturulmuş olan RSA (Rivest, Shamir, Adleman) şifreleme algoritmasıdır. RSA algoritması asimetrik şifreleme algoritmalarına uygun biçimde geliştirilmiş ve e-imza ve kimlik doğrulama işlemlerinde kullanılmakla birlikte güvenli anahtar paylaşımı işlemlerinde kullanılmaktadır. (Yerlikaya, vd., 2005).

Bu çalışmada, öncelikle kullanılan temel tanım ve kavramlar anlatıldı. Diğer bölümlerde RSA kriptosistemi incelenerek RSA algoritmasının hızını artırmak için yapılmış olan algoritmalar incelenmiştir. Bu algoritmaların uygulaması java programlama dili kullanılarak yapılmış ve performansları değerlendirilmiştir.

## Materyal Ve Metod

### Asimetrik şifreleme

Genel anahtar şifreleme sistemi olarak da adlandırılan asimetrik şifreleme, ilk kez Whitfield Kiffie ve Martin Hellman tarafından sunuldu. Bu şifreleme sisteminin temel amacı şifreleme ve şifre çözme işleminin farklı anahtarları kullanmasıdır. Genel anahtar şifreleme, daha önce sözü edilen simetrik şifreleme sisteminde anahtar dağıtım konusundaki eksikliği giderir.

Asimetrik kriptosistemlerde açık (public) ve özel (private) anahtar olarak adlandırılan iki ayrı anahtar kullanılmaktadır. Böylece simetrik kriptosistemlerde yapılmak zorunda olan anahtar takas işlemine gerek duyulmaz (Çenesiz, Soğukpınar, 2000). Açık anahtarlı şifreleme algoritmalarında kullanılan özel anahtar, genel anahtar adı verilen diğer bir anahtar kullanılarak belirli matematiksel işlemler sonucunda elde edilir. Genel anahtardan özel anahtarı elde etmek zor olduğundan genel anahtarı ele geçiren biri mesajı deşifre edemez.

Yaygın bir şekilde kullanılan açık anahtarlı şifreleme algoritmaları;

- 1977, RSA
- 1985, El-Gamal
- 1986, Eliptik Eğri

Asimetrik şifreleme algoritmalarının genel olarak iki kullanım alanı vardır: Şifreleme ve dijital imza.

### Eliptik Eğri şifreleme algoritması (EEC)

Eliptik Eğri şifreleme algoritması 1985 yılında RSA şifreleme algoritmasına alternatif olarak sunulan bir algoritmadır (Kurt, 2012). RSA algoritması ile şifreleme yapıldığında veri güvenliğini sağlamak için kullanılan asal sayıların büyüklerinin artırılması RSA şifreleme algoritmasının şifreleme ve şifre açma hızını oldukça düşürdüğünden IEEE

P1363 standartlarını yerine getiren Eliptik Eğri algoritması sunulmuştur (Gupta vd., 2002). RSA şifreleme algoritması veri güvenliği için kullanılan büyük asal sayıların çarpanlarına ayrılması esasına dayanırken Eliptik Eğri

algoritmasında ayrık logaritma problemi(ALP) kullanılmaktadır.

NESSIE (New European Schemes for Signature, Integrity and Encryption) tarafından yayımlanan bir rapora göre Eliptik Eğri şifreleme algoritmasında daha küçük uzunlukta sayılar kullanılarak yapılan şifreleme sisteminin RSA şifreleme algoritmasına eş değer olduğu görülmüştür (NESSIE Consortium, 2003). Aynı zamanda bu raporda Eliptik Şifre algoritmasının RSA kriptosistemine göre daha hızlı şifreleme yaptığı gözlemlenmiştir.

### RSA şifreleme algoritması

RSA şifreleme sistemi asimetrik şifreleme algoritmalarının en bilinenidir (Bellare, Rogaway, 1994). RSA, MIT çalışanı olan Ron Rivest, Adi Shamir ve Len Adleman tarafından 1977 yılında bulunmuş ve bu üç kişinin soyadlarının baş harfleri birleştirilerek isimlendirilmiştir (Okumuş, 2012). Martin Gardner, 1977 yılında yazılan bir makalede RSA'nın buluşundan bahsetmiştir. Bu yöntem basit bir matematiksel hesaba dayandırılarak geliştirilmiştir (Yıldırım, 2014). Daha sonra asimetrik kriptosistemlere uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Hem mesaj şifreleme hem de dijital imza işlemlerinde güvenli bir şekilde kullanılır (Koç, 1994). S/MIME, PEM, MOSS ve PGP gibi gizli elektronik haberleşme protokolleri RSA şifreleme algoritmasını kullanır (Yerlikaya, vd., 2005). RSA şifreleme algoritması şifrelemenin yanında imzalama için de kullanılan algoritmadır (Stallings, 2003).

RSA kriptosisteminde kullanılan genel ve özel anahtar mesajı almak isteyen tarafından üretilir. Genel anahtar herkesin kullanımına açıktır. Alıcıya mesaj göndermek isteyen taraf bu genel anahtar ile mesajı şifreler ve karşıya gönderir. Alıcı gelen mesajı daha önceden ürettiği gizli anahtar ile açar ve orijinal mesajı elde eder.

### RSA algoritmasının çalışma yapısı

RSA kriptosisteminde şifrelenecek olan mesaj öncelikle  $[0, N-1]$  arasındaki pozitif tamsayı



bloklar haline dönüştürülür (Yerlikaya, vd., 2005). Aşağıda RSA algoritmasının çalışma yapısı anlatılmıştır (Jahan, vd., 2015).

#### Anahtar Oluşturma Algoritması:

- Yaklaşık olarak eşit bit uzunluğuna sahip, birbirinden bağımsız p ve q gibi iki büyük asal sayı seçilir.
- Bu asal sayıların çarpımı  $N = p \cdot q$  ve bu sayıların bir eksiklerinin çarpımı  $\phi(N) = (p-1) \cdot (q-1)$  değeri hesaplanır.
- $1 < e < \phi(N)$  ve  $\phi(N)$  ile aralarında asal olan bir e sayısı seçilir.
- Genişletilmiş Öklid algoritması ile seçilen bu e sayısının mod  $\phi(N)$ 'e göre tersi hesaplanır; sonuç d gibi bir tamsayıdır.  $d \equiv e^{-1} \pmod{\phi(N)}$
- Alıcı tarafın genel anahtarı e, N, özel anahtarı ise d, N olur.

RSA kriptosistemindeki bu anahtar üretim algoritmasında oluşan N sayısına modülüs, e herkes tarafından bilinen genel anahtar ve d ise özel anahtar olarak adlandırılır. p ve q sayılarının çarpımı sonucu elde edilen N sayısı hem şifreleme hem de şifre açma işlemlerinde kullanılır.

#### Şifreleme İşlemi:

- Gönderici, veriyi alacak tarafın açık anahtarı olan e, N' yi bulur.
- Şifrelenecek olan metin,  $M \in [N - 1]$  olmak şartıyla bir tamsayıya dönüştürülür.
- Şifrelenecek metnin e'ninci kuvveti alınıp ve mod N'ye göre karşılığı hesaplandığında şifreli metin oluşturulmuş olur.  $C \equiv M^e \pmod{N}$
- Gönderici şifreli metni (C) alıcıya gönderir.

#### Şifre Açma İşlemi:

Alıcı taraf açık metni elde edebilmek için  $M \equiv C^d \pmod{N}$  işlemini gerçekleştirir. Şifre açma işleminin doğrulaması aşağıda gösterilmiştir:

- $M^{\phi(N)} \equiv 1 \pmod{N}$
- $e \cdot d \equiv 1 \pmod{\phi(N)}$

- $e \cdot d \equiv k \cdot \phi(N) + 1$
- $C^d \equiv M^{(e \cdot d)} \equiv$
- $M^{(k \cdot \phi(N) + 1)} \equiv (M^{\phi(N)})^k \cdot M$
- $\equiv M \pmod{N}$

RSA şifreleme algoritmasında anahtar oluşturulurken asal sayılar kullanılmasının amacı, asal sayıların çarpanlarına ayrılmasının diğer sayılara göre daha zor olmasıdır. Böylece üretilen anahtarın elde edilmesi daha zor olmaktadır.

#### Örnek:

##### Anahtar üretimi:

- İki asal sayı seçilsin  $p = 13, q = 11$
- $N = p \cdot q$  değeri  $N = 13 \cdot 11 = 143$
- $\phi(N) = (p-1) \cdot (q-1) = 12 \cdot 10 = 120$
- $\phi(N)$  ile aralarında asal ve  $1 < e < \phi(N)$  koşulunu sağlayan bir e sayısı seçelim.  $1 < e < 120, e = 7$  olsun.
- $1 < d < \phi(N)$  ve  $e \cdot d \equiv 1 \pmod{\phi(N)}$  koşulunu sağlayan  $d = 103$  tür.
- Alıcı tarafın genel anahtarı  $e = 7, N = 143$ , gizli anahtarı  $d = 103, N = 143$  olur.

##### Şifreleme işlemi:

- Alıcı taraf genel anahtar olan  $e=7, N=143$  sayılarını gönderici tarafa herkes tarafından görülebilecek şekilde gönderir.
- Göndericinin açık metni  $M=9$  olsun.
- Gönderici taraf  $C \equiv 9^7 \pmod{143}$  koşulunu sağlayan  $C = 48$  sayısını bulur.
- Gönderici taraf  $C = 48$  sayısını herkes tarafından ulaşılabilecek bir kanal ile karşı tarafa gönderir.

##### Şifre Açma işlemi:

- Alıcı taraf  $M \equiv 48^{103} \pmod{143}$  koşulunu sağlayan M sayısını bulup açık metni elde eder.

#### RSA algoritmasında hız

RSA şifreleme algoritmasının güvenilirliğini arttırmak için çok büyük asal sayılar kullanılır. Şifreleme ve deşifreleme işlemi bu çok büyük asal sayılar kullanılarak gerçekleştirildiğinden dolayı sonuca ulaşma süresi artmaktadır. Bu yüzden çok büyük mesajların RSA ile şifrelenmesi çok uygun görülmez (Montgomery, 1985; Scheinder, 1996; Stallings, 1998). RSA

şifre açma süresi büyük şifre çözme üssüne sahip olduğundan şifreleme süresinden daha uzundur

Şifreleme ve şifre açma sürelerini kısaltmak için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. Çok büyük asal sayılar kullanılarak işlem yapılan RSA için Montgomery tarafından 1985 yılında Montgomery algoritması oluşturulmuştur. Bu algoritmanın hızını düşüren diğer bir sebep kullanılan anahtar boyutlarının büyük olmasıdır. Bunu iyileştirmek için 1990 yılında Wiener tarafından Rebalanced CRT-RSA ve 2003 yılında da Paixo ve Alison tarafından RPrime RSA algoritmaları üretilmiştir. Ayrıca RSA algoritmasının şifre açma hızını yaklaşık 4 kat oranında arttıran CRT-RSA algoritması Quisquater ve Couvreur tarafından 1982 yılında sunulmuştur. Daha sonra Collins vd. 1997 yılında CRT-RSA algoritmasını kullanarak şifre açma kısmında MultiPrime-RSA algoritmasını sunmuşlardır.

### RSA şifreleme hızını arttıran algoritmalar

RSA şifreleme algoritmasının hızını arttıran algoritmalarından bazıları;

#### Montgomery Modüler Çarpım Algoritması

Peter Montgomery tarafından tasarlanan bir algoritmadır. Bu algoritma birtakım donanım elemanları kullanılarak bölme işlemi gerçekleştirilmeden modüler kalan değerini daha hızlı bir şekilde hesaplamaktadır (Bayram, Örs, 2010; Koltuksuz, 1998).k sayısı n bitlik bir tamsayı olmak şartıyla; a ve b asal sayılarının N modülüsüne göre çarpımı hesaplanır.  $R^{-1}$  değişkeni R'nin mod N'ye göre tersidir.

Girdi:  $a = (a_{k-1} \dots a_0)_2$ ,  $b = (b_{k-1} \dots b_0)_2$ ,

$n_{k-1} = 1$  olmak şartıyla;  $N = (n_{k-1} \dots n_0)_2$ ,  $R = 2^k$

Çıktı:  $MONT(a,b) = a \cdot b \cdot R^{-1} \text{ mod } N$

1.  $R \leftarrow 2^k$
2.  $N' \leftarrow -N^{-1} \text{ mod } R$
3.  $P \leftarrow a \cdot b$
4.  $U \leftarrow (P \text{ mod } R) \cdot N' \text{ mod } R$
5.  $C \leftarrow (P + U \cdot N) / R$
6. if  $(C > N)$  then  $C \leftarrow C - N$
7. return (C)

#### Hızlı Mod Alma Algoritması

RSA şifreleme algoritmasında şifreleme işlemi yapılırken M açık metin, e genel anahtar ve N değeri modülüs olmak koşuluyla;

Girdi: M,e,N

Çıktı:  $M^e \text{ mod } N$

e binary formata dönüştürülür.

1.  $e_n = \sum_{i=0}^{n-1} e(0,i) 2^i, \dots, \dots,$
  2.  $K=1, P=M$
  3. for  $i=0$  to e do
  4.  $P = P^2 \text{ mod } N$
  5. if  $e_i=1$  then
  6.  $P = K \cdot P \text{ mod } N$
  7.  $P = P^2 \text{ mod } N$
  8. Return P
- End  
End

*Binary Modüler Üs Alma Algoritması* (Koç, 1994)

RSA şifreleme algoritmasında şifrelenecek metin olan M, genel anahtar e ve modülüs değeri n olmak şartıyla;

Girdi: M,e,n ,  $e=(e_{k-1}e_{k-2} \dots e_1e_0)$

Çıktı:  $C=M^e \text{ mod } n$

1. if  $e_{k-1}=1$  then  $C=M$  else  $C=1$
2. for  $i=k-2$  downto 0
- 2a.  $C=C \cdot C \text{ (mod } n)$
- 2b. If  $e_i=1$  then  $C= C \cdot M \text{ (mod } n)$
3. return C

### Araştırma Bulguları

Aşağıda bahsedilen uygulamalar işlemci türü AMD A6, işlemci hızı 1.50GHz, sabit disk 500 GB, Bellek 6 GB, işletim sistemi Windows 10 olan bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan şifreleme uygulamaları, java programlama dili ile standart kriptoloji kütüphaneleri kullanılmadan NetBeans IDE 8.2 kullanılarak yapılmıştır.

RSA algoritmasının 256, 512, 1024, 2048 bit uzunluğunda sayılar kullanılarak özel anahtar ve şifreleme işlemlerinin ortalama süresi saniye cinsinden aşağıdaki tabloda yer almaktadır. Açık anahtar=3649134810816461 olarak alınmıştır. Şifrelenen mesaj=123620 olarak belirlenmiştir.

*Tablo 1. Standart rsa uygulaması performansı*

p-q Sayılarının uzunluğu(bit)	Açık Anahtar	Özel Anahtar Bulma Süresi(sn)	Şifreleme Süresi(sn)
256	3649134810816461	0,0085	0,0104
512	3649134810816461	0,0094	0,0209
1024	3649134810816461	0,0289	0,0587
2048	3649134810816461	0,0578	0,0685

Hızlı mod alma algoritması kullanılarak yapılan RSA uygulamasının çalışma performansı aşağıda tablo 2’de verilmiştir.

Açık anahtar=3649134810816461 olarak alınmıştır. Şifrelenen mesaj=123620 olarak belirlenmiştir.

*Tablo 2. Hızlı mod alma algoritması kullanılarak rsa uygulaması performansı*

p-q Sayılarının uzunluğu(bit)	Açık Anahtar	Özel Anahtar Bulma Süresi(sn)	Şifreleme Süresi(sn)
256	3649134810816461	0,0059	0,0042
512	3649134810816461	0,0011	0,0084
1024	3649134810816461	0,0167	0,0201

Binary modüler üs alma algoritması kullanılarak yapılan RSA uygulamasının çalışma performansı aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Açık anahtar=3649134810816461 olarak alınmıştır. Şifrelenen mesaj=123620 olarak belirlenmiştir.

*Tablo 3. Binary modüler üs algoritması kullanılan rsa uygulaması*

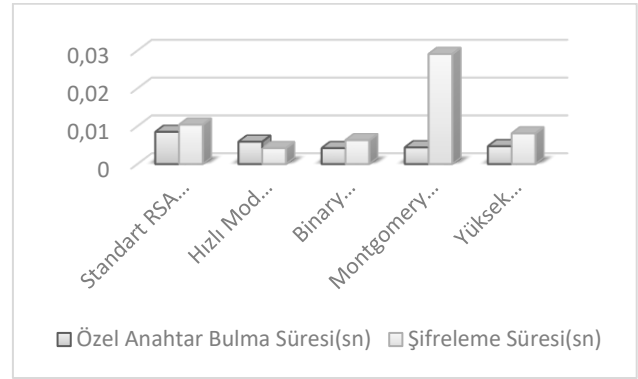
p-q Sayılarının uzunluğu(bit)	Açık Anahtar	Özel anahtar Bulma Süresi(sn)	Şifreleme Süresi(sn)
256	3649134810816461	0,0042	0,0063
512	3649134810816461	0,0175	0,0086
1024	3649134810816461	0,0182	0,0262
2048	3649134810816461	0,0546	0,0326

Montgomery Çarpım Algoritması kullanılarak yapılan RSA uygulamasının çalışma performansı Tablo 4’te yer almaktadır.

*Tablo 4. Montgomery çarpım algoritması ile rsa çalışma performansı*

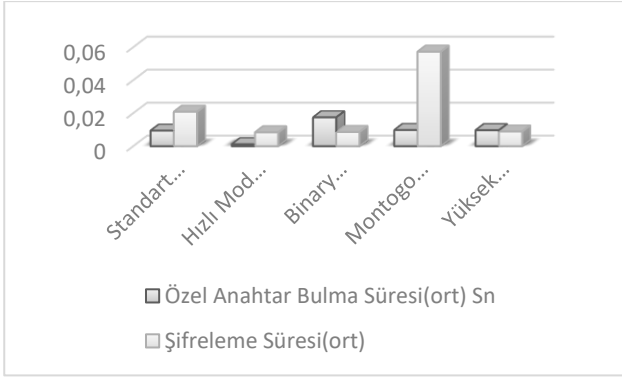
p-q Sayılarının uzunluğu(bit)	Açık Anahtar	Özel Anahtar Bulma Süresi(sn)	Şifreleme Süresi(sn)
256	3649134810816461	0,0044	0,0291
512	3649134810816461	0,0098	0,0573
1024	3649134810816461	0,0131	0,1085
2048	3649134810816461	0,0221	0,2122

Tablo 1, Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4’teki performanslar göz önüne alınarak aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



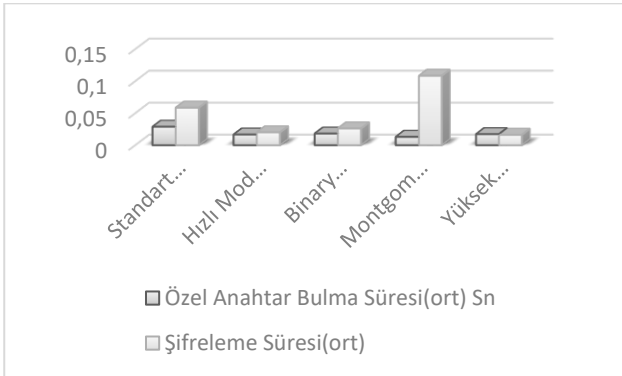
*Şekil 1. 256 bit uzunluğunda p ve q – e = 3649134810816461*

Şekil 1’deki veriler 256 bit uzunluğunda p, q sayıları ile e= 3649134810816461 açık anahtarı kullanılarak elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi özel anahtar Binary Modüler Üs Alma algoritması kullanıldığında en kısa sürede bulunmuştur. Şifreleme hızlarına bakıldığında ortalama olarak 0,004 saniye ile en hızlısı Hızlı Mod Alma algoritması, en yavaşı Montgomery Modüler Çarpım algoritmasıdır. Montgomery Modüler Çarpım algoritması çok işlem içerdiğinden sadece yazılımda iyi performans göstermemektedir. Gerekli donanım desteği yapıldığında başarılı bir performans gösterdiği yapılan araştırmalar neticesinde elde edilmiştir. Montgomery algoritması dışındaki diğer algoritmaların performanslarının standart RSA algoritmasından daha iyi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 1. 512 bit uzunluğunda p ve q –  
e=3649134810816461

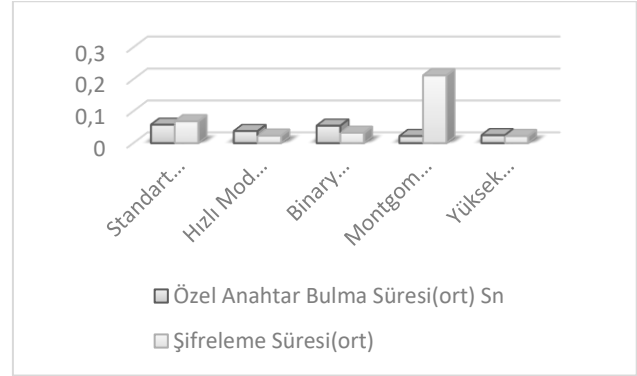
Şekil 2'deki veriler 512 bit uzunluğunda p, q sayıları ile e= 3649134810816461 açık anahtarı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil incelendiğinde en iyi performans Hızlı Mod Alma algoritması kullanıldığında elde edilmiştir. Hızlı Mod alma algoritması kullanıldığında şifreleme süresinin ortalama olarak yaklaşık 0,008 saniye olduğu görülmüştür. 256 bitlik p ve q kullanıldığında 0,004 saniye olan şifreleme süresinin 2 kat arttığı gözlemlenmiştir. p ve q sayılarının uzunluğunun artması şifreleme ve özel anahtar bulma süresini de arttırmıştır. 512 bitlik sayılar kullanıldığında Hızlı Mod Alma algoritması kullanıldığında şifreleme süresinin Standart RSA algoritmasına göre yaklaşık olarak 2,4 kat daha hızlı olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 1024 bit uzunluğunda p ve q –  
e=3649134810816461

Şekil 3'deki veriler 1024 bit uzunluğunda p, q sayıları ile e= 3649134810816461 açık anahtarı kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 3'e bakıldığı zaman p ve q sayılarının uzunluğunun 1024 bit

olması ile şifreleme performansı Hızlı Mod Alma algoritması kullanıldığında en iyidir. Hızlı Mod Alma algoritmasının Şekil 2'deki performansı Şekil 3'teki performanslar kıyaslanırsa yaklaşık olarak 2,5 kat oranında bir düşüş gözlenmektedir. Montgomery algoritmasının performansının yine çok düşük olduğu görülmektedir. Hızlı Mod Alma algoritmasından sonra en iyi performans Binary Modüler Üs Alma algoritmasındadır.



Şekil 3. 2048 bit uzunluğunda p ve q –  
e=3649134810816461

Şekil 4'deki veriler 2048 bit uzunluğunda p, q sayıları ile e= 3649134810816461 açık anahtarı kullanılarak elde edilmiştir. 2048 bit uzunluğundaki p ve q sayıları kullanıldığında şifreleme performansları en iyiden başlayarak sıralanırsa Hızlı Mod Alma algoritması, Binary Modüler Üs Alma Algoritması, Standart RSA ve Montgomery Modüler Çarpım algoritmasıdır. Hızlı Mod Alma algoritması ortalama olarak 0,02 saniyede şifreleme işlemini gerçekleştirmiştir. Standart RSA'dan yaklaşık olarak 3 kat daha hızlıdır. Binary Modüler Üs Alma algoritması ise ortalama 0,03 saniyede şifreleme yapmış ve Standart RSA algoritmasından yaklaşık olarak 2 kat daha hızlı olduğu görülmüştür.

## Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, asimetric şifreleme algoritmaları arasında en çok kullanılan RSA şifreleme algoritması ve performansı incelenmiştir. Asimetric şifreleme algoritmalarında şifreleme ve şifre çözme iki anahtar kullanır. Ayrıca şifreleme ve deşifreleme işlemlerinde çok büyük asal sayılar kullanılır. Bu da asimetric şifreleme

algoritmalarının güvenliğini arttırmaktadır. Fakat, kullanılan bu büyük sayılar işlemlerin daha yavaş gerçekleşmesine sebep olmaktadır. RSA şifreleme algoritması da hem dijital imza hem de şifrelemede güvenli olduğu sebebiyle çok yaygın kullanılmaktadır. Ancak, kullanılan sayıların büyüklüğü hız problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu sebepten dolayı RSA algoritmasında şifreleme ve deşifreleme hızını arttıran algoritmalar geliştirilmiştir. Şifreleme hızını arttıran algoritmaların bazıları incelendi ve java programlama dili kullanılarak uygulamaları yapıldı. Bu algoritmaların RSA kriptosistemin kullanılmasıyla RSA'nın çalışma performansı ölçüldü.

Yapılan performans ölçümleriyle, en hızlı şifrelemenin Hızlı Mod Alma algoritması kullanıldığında gerçekleştiği görülmüştür. Standart RSA algoritmasından ortalama olarak 2,5 katı daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Üstelik kullanılan sayıların büyüklüğü arttıkça aradaki hız farkının arttığı gözlemlenmiştir. Binary Modüler Üs alma algoritması ise Standart RSA algoritmasına göre ortalama olarak 2 kat daha hızlıdır. Montgomery Modüler Çarpım algoritmasının sadece yazılımda çok başarılı olmadığı görülmüştür. Fakat, gerekli donanım desteği yapıldığında Standart RSA algoritmasına göre yaklaşık olarak 2 kat daha hızlı çalıştığı yapılan araştırmalar neticesinde elde edilmiştir.

## Kaynaklar

- Aksuoğlu, A. (2010). RSA Algoritmasının İyileştirilmesi için Yeni Bir Yaklaşım. *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi.
- Bayam, K. A., & Örs, B. (2010). Differential power analysis resistant hardware implementation of the RSA cryptosystem. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **18**(1), 129-140.
- Bellare, M. & Rogaway, P. (1994). Optimal Asymmetric Encryption-How to encrypt with RSA. *Advances in Cryptology-CRYPTO'94*.
- Çenesiz, F. & Soğukpınar, D. (2000). Kurumsal Ağ Güvenliğinde Sayısal İmza Kullanımı: Tasarım ve Uygulama. *5.Bilgisayar Ağları Sempozyumu BAS2000*, Ankara, 198-207
- Gupta, V., Gupta, S., Chang, S., & Stebila, D. (2002, September). Performance analysis of elliptic curve cryptography for SSL. *In Proceedings of the 1st ACM workshop on Wireless security* (pp. 87-94). ACM.
- Jahan, I., Asif, M., & Rozario, L. J. (2015). Improved RSA cryptosystem based on the study of number theory and public key cryptosystems. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, **4**(1), 143-149.
- Koç, Ç.K. (1994). High-Speed RSA Implementation. *Technical report. RSA Laboratories TR201*
- Koltuksuz, A., Güvenlik, E. T., & Denetimi, Ö. (1998). Doğruluk, Bütünlük ve Sayısal İmza. *4. Türkiye İnternet Konferansı*, İstanbul-Türkiye.
- Kurt, M. (2012). Eliptik Eğri Şifreleme Algoritmasının Uygulaması Ve Analizi. *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Montgomery, P. L. (1985). Modular multiplication without trial division. *Mathematics of computation*, **44**(170), 519-521.
- Nagar, S. A., & Alshamma, S. (2012, March). High speed implementation of RSA algorithm with modified keys exchange. *In 2012 6th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)* (pp.639-642). IEEE.
- NESSIE Consortium, (2003). NESSIE Security Report, *Technical report NESSIE*.
- Okumuş, İ. (2012). RSA Kriptosisteminin Hızını Etkileyen Faktörler. *Doktora Tezi*, Atatürk Üniversitesi.
- R. L. Rivest, A. Shamir and L. Adleman.( 1978). "A method for obtaining digital signatures and public-key cryptosystems" *Communications of the ACM*, vol. 21, pp. 120-126.
- Schneider B. (1996). *Applied Cryptography*.New York.
- Stallings, W. (1995). *Network and internetwork security: principles and practice* (Vol. 1). Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Stallings W. (1998). *Cryptography and Network Security: Principles and Practice*. Prentice Hall. ISBN 0-13-869017-0.
- Stallings, W. "Cryptography and network security vol. 2" prentice hall, 2003.
- Verma, S., & Garg, D. (2011). Improvement in RSA cryptosystem. *Journal of Advances in Info*
- Yerlikaya, T. (2006). Yeni Şifreleme Algoritmalarının Analizi. *Doktora Tezi*, Trakya Üniversitesi.

- Yerlikaya, T., Buluş, E., Ve Arda, D. (2005). Asimetrik Kriptosistemler ve Uygulamaları. *II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi*, İstanbul
- Yerlikaya, T. (2006). Yeni Şifreleme Algoritmalarının Analizi. *Doktora Tezi*, Trakya Üniversitesi.
- Yerlikaya, T., Buluş, E., & Buluş, H. N. (2007). RSA şifreleme algoritmasının pollard RHO yöntemi ile kriptanalizi. *IX. Akademik Bilişim'07. Information Technology*, 2(3), 146-151
- Yerlikaya, T., Gençoğlu, H., Emir, M. K., Çankaya, M., & Buluş, E. (2013). Rsa Şifreleme Algoritması Ve Aritmetik Modül Uygulaması. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi*, 3(9), 95-104.
- Yıldırım, H. M. (2014). Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji. Uluslararası Adli Bilişim Sempozyum. [http://hmurat.bilkent.edu.tr/kripto\\_01062014.pdf](http://hmurat.bilkent.edu.tr/kripto_01062014.pdf)
- Yıldırım, K. (2006). Veri Şifrelemesinde Simetrik Ve Asimetrik Anahtarlama Algoritmalarının Uygulanması (Hybrid Şifreleme). *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

## Algorithms and performances increasing the encoding speed of rsa algorithm

### Extended Abstract

Thanks to the developing technology, the amount of data circulating in the network is increasing day by day and this increase brings with it the problem of data protection. In order to ensure the security of the data in communication and to understand whether it is transmitted to the correct address, a variety of methods called encryption and digital signatures are used. As the telecommunication network has grown explosively and the internet grows rapidly, information security becomes more and more significant.

In this study, asymmetric and symmetric encryption is divided into two of these encryption methods asymmetric encryption method is discussed. The RSA (Rivest, Shamir, Adelman) algorithm, which is used as the most broadcast among asymmetric encryption algorithms, was investigated. This algorithm relies on the difficulty of factoring large numbers which has seriously affected its performance and so restricts its use in wider applications.

There are some problems when encrypting data using RSA algorithm. The most important of these problems is the speed problem. This paper aims to speed up the implementation of the RSA algorithm Although RSA algorithm is very secure, it is rarely used in smart card, due to its long computation time

In the RSA algorithm, encryption and decryption of data is slower because the mathematical operations used for encryption and decryption(decryption) operations are intensive and because of the use of very large prime numbers to increase security. Therefore, a variety of algorithms are used to increase the encryption and decryption speed of the RSA algorithm. The effects of these algorithms in increasing the speed of RSA were compared with the working performances of these algorithms during the encryption process.

In this study, firstly, algorithms developed to increase the encryption rate of RSA cryptosystem were investigated. Later, the standard RSA algorithm was implemented using the Java programming language. As a result of this application, the RSA algorithm's

private key discovery and encryption time were calculated on average. After the performance of the standard RSA algorithm was measured, the application of the RSA encryption algorithm was performed separately using the Fast Modular Exponentiation, Binary Modular Exponentiation, and Montgomery Modular Multiplication algorithm which increased encryption speed. The performance of RSA cryptosystem was measured for each algorithm used as a result of the applications. The measured performances were first compared with the operational performance of the Standard RSA algorithm. According to the data obtained, the fastest encryption was performed when using the Fast Modular Exponentiation Algorithm. When using the Fast Modular Exponentiation algorithm, encryption speed was approximately 2.5 times faster than the standard RSA algorithm.

Encryption time of Binary Modular Exponent Algorithm Compared to with Standard RSA, this algorithm is 2 times faster than the Standard RSA. The Montgomery Modular Multiplication algorithm, which is one of the algorithms that increase the RSA encryption speed, is not only performing well in the software. As a result of the researches done, it is understood that this algorithm performs the encryption process approximately 2 times faster than the standard RSA algorithm when the necessary hardware support is provided.

When using 256-bit  $p$  and  $q$  numbers, the fastest encryption was performed by Binary Modular Exponent Algorithm, and as the number of these numbers increased, the performance of this algorithm decreased and the Fast Mode Acquisition algorithm performed better. When the algorithms are compared among themselves, the algorithm that makes encryption the fastest has been found to be the Fast modular Exponentiation algorithm.

When these applications were performed, the length of the public key used in the RSA encryption algorithm was taken as 3649134810816461 and the message that was encrypted was determined as 123620. In addition, it has been seen that increasing the length of  $p$  and  $q$  numbers increases the encryption time of RSA encryption algorithm.

**Keywords:** Asymmetric Encryption, Rsa, Speed of Rsa



# Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santralının Şebeke İle Paralel Çalışmasında Olası Adalaşma Probleminin Matlab Simülasyon Ortamında Değerlendirilmesi

**Sadi Serdar GÜNELİ\***

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[ssguneli@dicle.edu.tr](mailto:ssguneli@dicle.edu.tr) ORCID 0000-0003-2618-9035, (412) 241 1000 (5960)

**Muhammet Ali ARSERİM**

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[marserim@dicle.edu.tr](mailto:marserim@dicle.edu.tr) ORCID 0000-0002-9913-5946, (412) 241 1000 (0000)

**Rıdvan KENANOĞLU**

Dicle Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Diyarbakır  
[ridvan.kenanoglu@dicle.edu.tr](mailto:ridvan.kenanoglu@dicle.edu.tr) ORCID 0000-0002-4480-1657, (412) 241 1000 (7839)

Geliş: 26.06.2019, Revizyon: 28.06.2019, Kabul Tarihi: 08.08.2019

## Öz

Türkiye’de Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin yönetmenlik; 14/3/2013 tarihli ve 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanununun 14 üncü maddesi kapsamında değiştirilmesi ile Ülkemizde bir çok yerel elektrik santrali kurulmuş ya da kurularak elektrik şebekeleri ile paralel çalışır duruma getirilecektir. Yapılan son kanun değişiklikleri ile birçok yerel elektrik santralının kurulması ve işletmeye alınması işlemleri devam etmektedir. Bu santrallerin enerji üretimine büyük katkısının yanında şebeke ile paralel çalışması sırasında teknik personel ve diğer tüketiciler açısından çeşitli problemler doğurmaktadır. Bu çalışmada öncelikle, Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santralının Ana Şebeke ile bağlantısı Matlab simülasyon ortamında modellendikten sonra olası arızalara karşı elde edilen veriler gözlemlenmiştir. Daha sonra Ana Şebeke ile paralel çalışan Santralin, Mühendislik Fakültesini beslemesi durumunda oluşacak farklı senaryolar simülasyon ortamında tasarlanmıştır ve bu simülasyonların sonuçları değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Dağıtık Üretim, Adalaşma, Rocof, Bireysel Yerel Santral.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

Günümüzde, nüfus artışı ve elektrik-elektronik teknolojisindeki gelişmeler dünyada ve ülkemizdeki toplumların elektrik enerjisine olan bağımlılığını artırmaktadır. Fosil yakıtların tükeniyor olması ve çevre sorunları oluşturması, dünyadaki bütün ülkeleri alternatif enerji kaynaklarını kullanmaya teşvik etmiştir. Yaşanan bu gelişmeler geleneksel elektrik enerji sistemlerinin yeniden yapılandırılmasına sebep olmuştur.

Elektrik enerjisi büyük güçlerde, şehir merkezlerinin dışında üretilmesi sebebiyle, en az kayıpla enerji iletim sistemleri yardımıyla merkeze taşınmak zorunda bırakılmıştır. Sanayiciler enerji kalite ve arıza problemlerinden dolayı bireysel yerel santrallerini kurmuşlardır( Powell L J 1988) (Warin J W 1990). Lokal santrallerden elde edilen elektrik enerjisinin maliyetinin yüksek olması nedeniyle aynı kaynağı hem ısı enerjisi hem de elektrik enerjisi üreten CHP (Combine Heat and Power) teknolojisi ile düşürmeye çalışmışlardır( Powell L J 1988) (Woodworth M 1996). Devletlerde özellikle nüfusun yoğun olduğu yerlerde bu santralleri tercih etmişlerdir.

Üniversitelerde yapılan araştırmalar ve gelişen röle teknolojisi Bireysel Yerel Santrallerin (Embedded Generation) geleneksel enerji sistemine bütünleşmiş ( entegre ) çalışmasını sağlamıştır. Böylece düşen enerji maliyetleri bir anda Lokal Santrallerden elektrik enerjisi üretimini teşvik etmiştir..

Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtlara alternatif bir kapasiteye sahip olmasına karşın elektrik enerjisi üretme maliyetlerinin yüksek olması ve büyük güçlerde enerji üretmenin zor olması nedeniyle piyasada istenilen talebi oluşturmuyordu. Ana şebekeye entegre edilen Bireysel Yerel Santraller Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının enerji üretim maliyetini düşürmesi ve yapılan araştırmalar sonucu özellikle Güneş Enerjisi ve Rüzgar Enerjisinden

daha verimli enerji elde edilmesiyle tüm dünyada Yenilenebilir Enerjinin kullanılmasının önünü açmıştır. Ülkemizde, yenilenebilir enerjinin en önemli kaynaklarından biri, solar sistemlerdir.

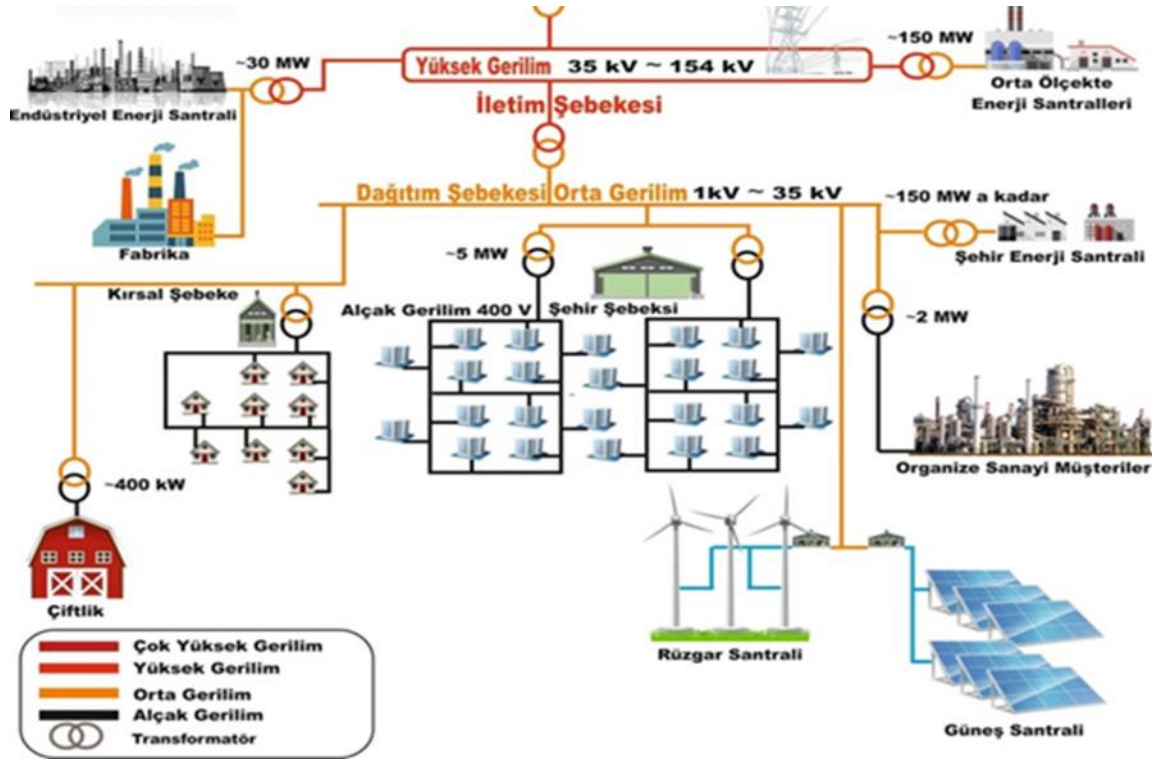
Yenilenebilir enerjiden geleneksel enerji üretim sistemleri ile kıyaslandığında küçük güçlerde elektrik enerjisi üretilse de, bu sistemlerin, tüketim merkezlerinin yakınında elektrik enerjisi üretmesi ve gelişen röle teknolojisi ile elektrik dağıtım sistemlerine bütünleşmiş (entegre) çalışması sayesinde elektrik enerji iletim sistemlerinde önemli değişikliklere neden olmuştur.

Bu makalede, Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santralının Ana Şebeke ile paralel çalışması neticesinde oluşabilecek arızalarda adalaşma matlab simülasyon programında oluşturulmuş ve öneriler sunulmuştur.

## Materyal ve Yöntem

### Dağıtılmış Üretim Nedir?

Dağıtılmış Üretim(DÜ), (DG) veya Embedded Generation (Geleneksel sisteme gömülü entegre Bireysel Yerel Üretim Santralleri) sayılarının fazlalığı ve bağlantı noktaları dolayısı ile geleneksel şebeke sistemi ile bağlantılı bir kavramdır. Bireysel yerel üretim santralleri bağlantı noktalarında Ana şebeke ile paralel bağlanarak geleneksel sistemin aksine çift taraflı yük akışına olanak tanımanın yanında enterkonnekte sistemin bir parçası haline gelen Dağıtık Üretim santralleri olarak tanımlanırlar. Bu konsepti sürdüren Bireysel Yerel Üretim Santrallerine; Dağıtık Üretim Santralleri (Distributed Generation) (DG) olarak tanımlanır (Şekil 1). Bir kaç kilovat KW gücünden onlarca megavat MW güce kadar elektrik enerjisi üretme kabiliyeti olan küçük ölçekli generatörler ana şebeke ile dağıtım veya trafo istasyonu seviyesinde dahil olurlar (Bergen A.R. and Vittal V 2000) (Engineering Recommendation G59/1, 1985).



Şekil 1 İletim ve dağıtım seviyesinde dağıtık enerjinin santrallerinin şebekeye entegrasyonu

Dağıtık Üretim (DG) 5 kW'tan daha küçük güçlerden 25,000 kW'a kadar bazen daha büyük türbinlere ve dizel jeneratörlere kadar farklı güçlerde olabilmektedir. 25,000 kW seviyesi genellikle en üst aralık olarak kabul edilmektedir. Bu aralık küçük, orta ve büyük bireysel üretim santralleri olarak incelenmektedir (Jenkins N 1995) (Bergen A.R. and Vittal V 2000). Büyük güçte olanlar kapasite olarak 1000 kW ile 10,000 kW arasındaki dizel jeneratörlerdir. Bazı santraller yıl boyunca ana üretim santrali olarak tasarlanmışken bazıları sadece enerjiye yoğun ihtiyaç duyulduğu zamanlarda kullanılmaktadırlar (Muller L. ve ark. 1990). Büyük güçte olanlar genelde sanayi bölgelerindeki fabrikalar için ve/veya enerji dağıtım sistemine özel üretim yaparak katkı sunan bireysel yerel santraller olarak tasarlanmıştır. Küçük güçte olanlar ise bireysel evler ve küçük işletmeler gibi yoğun dağıtık uygulamalar için tasarlanmıştır (Koeppel G.

2003). Aralıkları 1500 kW ile 5000kW arasındadır. Bu tip santraller dağıtım şebekesi ile paralel çalıştığında gerilim ölçümleri daima müşteri tarafında yapılır. Bir evin tüm ihtiyacı veya bir işletmenin bazı ihtiyaçlarını karşılamak üzere bu sistemler tasarlanır (Mozina C.J. 2001) (Hodgkinson. G. 1998)

DG uygulamalarında Güneş fotovoltaik (PV), dizel motorlar, gaz türbinleri, biokütle, küçük hidroelektrik jeneratörler, rüzgâr tribünleri gibi çok çeşitli üretim teknolojileri kullanılmaktadır (Guo-Kiang Hung, et al). Bazı DG üniteleri doğal gazdan ve petrolden elektrik enerjisi üretmekle birlikte atık enerjiyi ısı enerjisine çevirerek ısınma amaçlı kullanır co-generation (Jenkins N. 1995) (Ackermann T. and Knyazkin V) (Ye. Z. et al 2003)

## Dağıtık Üretim Santrallerinin Ana Şebekeye Entegre Edilme Sebepleri

Dağıtık güç sistemleri kamu veya bireysel müşteriler tarafından işletilebilir enerji güç sistemlerine birçok yönden katkı sunabilir. Dağıtık üretim tesisleri enerji maliyetlerini düşürmenin yanında sistem güvenilirliğini artırabilir. Bununla birlikte çevre kirliliğini azaltırken enerji kalitesinin artmasına sebep olur (Burton T. et al. 2001) (Dugan. R.C. and McDermott. T.E. 2001).

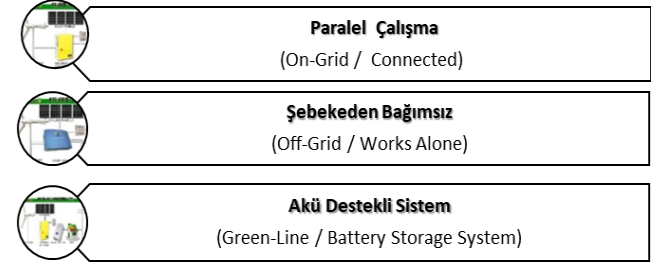
Geniş çaplı elektrik kesintisi olduğunda lokal yükler DÜ'lerden beslenmeye devam edeceği için, lokal yükler için enerji sürekliliği sağlanmış olur. Fakat ana şebekeden ayrılan her Bireysel Yerel Santral bir güç adası oluşumuna sebep olur. Bu durum adalaşma (Islanding) olarak tanımlanır. Bu durum bireysel yerel santrallerin lokal yükleri besleyeceği yeterli üretime sahip olmasının yanında dağıtım sisteminin kontrol eden sitemin yeterli olmasını gerektirir (Öhrström. M. 2003). Farklı kaynaklar kullanılarak üretim yapan jeneratörlerin yakıt seviyelerinin sınırlı olması veya yeterli güvenlik seviyesine sahip olmaması başarılı adalaşma çözümlerine rağmen DÜ'lerin istenilen faydayı sağlamasına engel diğer bir olasılığı oluşturur (Kashem M.A. and Ledwich. G 2002) ( Fickert. L. 2003).

Hızla artmakta olan elektrik enerji ihtiyacını DÜ'lerden sağlamak lokal yüklere yakın olması nedeniyle gerek kamu gerekse özel üreticiler tarafından yapılan yatırımların maliyetlerinde ciddi avantajlar elde edilir. Yerel santraller lokal yüklere yakın olması nedeniyle enerji kayıplarının azalmasında katkı sunar (Ye Z. et al. 2003 ).

Amerika'da yeni neslin eski nesille değiştirilmesi durumunda % 30 değişikliğin devletin enerji kaybını % 15 azaltacağı tahmin edilmektedir. Yılda altı milyar kilovat-saat enerji tasarrufuna karşılık gelmektedir (Bergen A.R. and Vittal. V. 2000 ). Diğer taraftan bireysel yatırımcıların kendi tesisleri kurmaları devletin karını düşürmekle beraber yatırımcılarına uzun vadeli enerji maliyeti

istikrarı ve bazı durumlarda tasarruf sağlar. (Bergen A.R. and Vittal V. 2000). Güneş enerjisi kaynak olarak kullanılırsa çevre kirliliğinin azalmasına büyük katkı sunar. Kesintisiz enerji sağlayan DÜ'ler kırpışma, voltaj regülasyonu gibi sorunları çözerek enerji kalitesinin artmasını sağlar(Tran-Quoc T., 2000).

## Dağıtım Sistemlerin Sınıflandırılması ve Şebekeye Entegrasyonları



Şekil 2-Dağıtık Üretim Sistemlerin Sınıflandırılması

Şekil 2'de görüldüğü gibi Bireysel Yerel Santrallerin gruplandırılması ve Ana şebekeye gömülmesi, paralel çalışması Şebeke Destekli ve Şebekeye Paralel DG sistemleri tarafından oluşturulacak besleme entegrasyonları, olası sorunları gündeme getirmektedir. Birleştirme, entegre öncesi bu sorunların tespit edilmesi, sistem işletmecisine, bireysel yerel santral tesisi sahibine ve dağıtım kısmındaki kullanıcılara önemli katkılar sağlayacaktır. Sorunların saptanması tasarlanmış sistem analizleri yolu ile tespit edilmelidir. DG' nin hangi noktadan dağıtım sistemine entegre edilmesi gerektiği, gerilim ve güç kontrolünün nasıl tespit edilmesi gerektiği, kırpışma ve harmonik etkiler varsa bunların nasıl engellenebileceği, üretim santrallerinin tesisin bağlandığı kısımda oluşturacağı kısa devre katkısı ve sisteme etkileri bu analizler yolu ile belirlenip, gerekli önlem ve çözümler üretilmelidir.

## DG'lerde Adalaşma (Islanding)

Dağıtılmış senkron jeneratörlerin koruma sistemleri mutlaka adalaşma durumunu tespit etmeli ve ana şebeke koruma kurallarını yerine getirmelidir. Dağıtık jeneratörler herhangi bir

arıza meydana geldiğinde ana şebekeden ayrılarak adalaşma durumunu oluşturur. Adalaşma meydana geldiğinde bireysel yerel santraller enerji üretmeye devam etmekte olduğu için hatlarda enerji akışı devam etmektedir. Bu durum ana şebekenin kaybı olarak bilinir (Loss of Main) (Jenkins,2000) (Bergen, Vital, 2000) (Muller, Boog, 1990). Lokal hatlara ana şebekeden akan yük akışı durmasına karşın sistem lokal jeneratörler tarafından beslenmeye devam etmesi çeşitli güvenlik risklerine sebep olur. Sistemde enerji olması hattı onarmaya gelecek olan personel için hayati risk oluşturmasının yanı sıra, sistemdeki arıza kalitesinin düşmesine ve lokal jeneratör ve yüklerin zarar görmesine sebep olur. Bu riskleri en aza indirmek için gerekli koruma sistemi hemen devreye girip adalaşmayı engellemelidir.

Bugüne kadar yapılan uygulamalarda adalaşma 200-400 ms arasında tespit edilmesi gerekliliği saptanmıştır. Bu koşulları yerine getirmek için her dağıtılmış Bireysel Yerel Santrali buna uygun bir koruma sistemi ile donatılmalıdır. Vektör dalgalanma (gerilim değişim oranı tespit) röleleri bu amaç için kullanılmaktadır. (Dispersed Generation, CIREC Working Group 4, 1999), (Jenkins N ve arkadaşları 2000) (Embedded Generation, London, 2000). Bu röleler sanayide büyük kabul görmüştür.

Tüm dağıtılmış senkron jeneratörler röle üreticilerinin tavsiyelerine ve elektrik şebekesinin frekans açma kurallarına göre yapılır (IEEE standart, 2003). Vektör dalgalanma ve frekans röleleri sistem frekans sapması koşulunda çalıştığı için rölelerden sadece biri kullanılarak koruma sistemi dizayn edilirse özellikle küçük güçteki jeneratörlerin korumasında ciddi tasarruf sağlanmış olur ve koruma sistemi oldukça basit hale gelir.

Diğer önemli bir sorun röle koruma gerekliliğindeki çelişkilerdir. IEEE standartları küçük voltaj değişikliklerinde DG' nin bağlantısının kesilmemesini önerir (IEEE standart, 2003). Röle bu gereksinimleri karşılayacak şekilde ayarlanmışsa adalaşma koşullarını istenen sürede tespit edemeyebilir.

Diğer yandan röle hassas ayarlanmışsa küçük frekans değişikliklerinden dolayı DG' yi açtırabilir.

### **Güç Sistem Koruması**

Temel güç sistemi koruma ilkeleri ve standartları literatürlerde belirtilmiştir (Bergen, Vital, 2000) (Muller , Boog, 1990). Güç sistemi korumasının temel amacı güç sistemlerinin güvenli çalışmasını, yani insanların, personelin, ekipmanın güvenliğini sağlamaktır. Bununla birlikte kaçınılmaz hataların sistemdeki etkisini en aza indirmektir. Elektriksel açıdan tehlikeli durumlar oluşabilir.(Geidl, 2005)

- Aşırı akımlar
- Aşırı gerilimler.

Örneğin; şebekelerin eş zamansız eşleşmesi (senkronize olmaması) yüksek akımlara neden olur.

Toprak arızaları yüksek dokunma voltajlarına neden olabilir ve bu nedenle insanların yaşamlarını tehlikeye sokabilir.

Genel sorun daima gerilim ve/veya akımın limit dışı olmasıdır.

Bu nedenle, güç sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için aşırı akımlardan ve aşırı voltajlardan kaçınmaktır.

Elektriksel arıza değerleri daima yüksek gerilimlerden veya akımlardan kaynaklanır.

Başka bir konu mekanik olaylardır. Güç elektromekanik olarak dönüştürülüyorsa, sadece elektrik değil mekanik donanım da dikkate alınmalıdır. örnek olarak buhar türbinlerinin düşük frekans nedeniyle mekanik rezonansı verilebilir. Günümüzde elektromekanik koruma cihazları, bir dizi entegre özelliğe sahip mikroişlemci tabanlı röleler ile değiştirilmiştir. Akımlar, voltajlar, hat uzunlukları, transformatörleri dijital forma dönüştürülür. Bu değerler açma kararlarına ulaşan çeşitli algoritmaların içine girerler. Gelişen benzetim programlarında farklı senaryolar oluşturulabilir.

Ağdaki koruyucu rölelerin tasarımı ve koordinasyonu için genel kurallar geniş çapta kabul görmüştür:

**Seçicilik:** Bir koruma sistemi arıza sonuçlarını en aza indirmek için sadece hatalı parçanın bağlantısını kesmelidir(veya arızayı içeren en küçük parça).

**Koordinasyon:** Bir koruma sisteminin işlevini yerine getirmesi için özen göstermelidir. Oluşabilecek farklı durumlar için röleler ile gereksiz koruma tasarımları değerlendirilip, farklı koruma ilkeleri birleştirilebilir. Örneğin; Hatlar için mesafe ve diferansiyel koruma ilkeleri birleştirilerek kullanılır.

**Derecelendirme:** Röle koruması sisteminin gereksiz veya yanlış açma yapmaması için röle koruması derecelendirilmelidir. Böylece koruma sisteminin güvenilirliği artırılmalıdır.(Geidl, 2005)

**Güvenirlilik:** Röleler yanlış açmalar ile sağlıklı çalışan enerji sistemini gereksiz olarak açmamalıdır. (Öhrström,2003)

**Alan Koruması:** Röle sistemi arızayı güç sisteminden en küçük alanı ayırarak sistemin geri kalanını etkilemeden koruma işlemini gerçekleştirmelidir. (Öhrström,2003)

Korumak için en basit ağ yapısı radyal sistemlerdir, bu nedenle basit röleler kullanılır (Bergen, Vital,2000). Normalde, zamana bağlı, kademeli aşırı akım koruma, fazlalık (yedekleme koruması) konusunda kurulur. Halkaların ve örgü ızgaraların korunması için daha karmaşık röleler kullanılır. Empedans röleleri düşük voltaj akım oranı nedeniyle tetiklenir.

Hatanın hat üzerindeki konumunu belirlemek için ayrıca mesafe röleleri olarak da adlandırılırlar (Jenkins,2000) ( Bergen, Vital, 2000) (Muller , Boog, 1990).

### **Kısa Devre Gücü ve Arıza Akım Seviyesi**

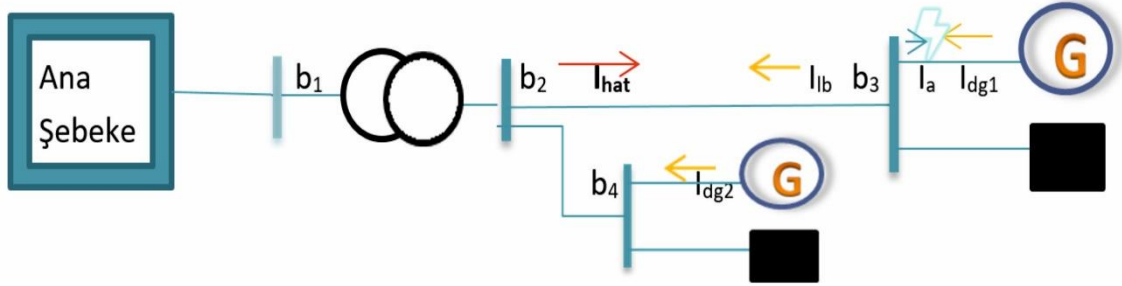
Arıza akımı seviyesi, arızaların akım veya güç açısından etkisini açıklar. Kısa devre akımı veya (görünür) güç artışı hakkında bir gösterge verir. ( N. Jenkins et al 2000)

Arıza akım seviyesi  $i=1/|z_{th}|$  olarak tanımlanır ( Koepfel. G 2003 ). Burada  $i$  nominal akımla ilgili arıza akımıdır ve  $z_{th}$  ise hattın thevenin empedansını p.u. olarak gösterir. Burada 1 p.u. anma akımına karşılık gelir.

Kısa devre durumlarında faz-faz veya faz-toprak arızaları normalde operasyonel veya nominal akımdan önemli ölçüde yüksek olan bir aşırı akımla sonuçlanır. Bu (anlık) aşırı akım korumanın işlevi için çok temel bir önkoşuldur. Rölenin arızayı hızlı algılaması için arıza akımı normal işletme akımından ayırt edilebilir olmalıdır.

Koruma rölesinin tetiklenmesi için yüksek hata akımı sağlayan güçlü bir kaynak bulunmalıdır. PV kurulumlarında özellikle dönüştürücüler genellikle yüksek akımı önleyen kontrol cihazları ile donatılmıştır. Özellikle güç elektroniği dönüştürücüler genellikle yüksek akımları önleyen kontrol cihazlarıyla donatılmıştır. Örneğin, bir dağıtım ağının uzak bir kısmı büyük PV kurulumlarında, bir arıza olması durumunda faz akımında neredeyse hiç önemli bir artış olmaz ve bu nedenle de aşırı akım koruma sisteminde arıza tespit edilemez. Arıza akımının genliği, arıza empedansına, faz arızası için de topraklamaya büyük ölçüde bağlıdır.

Şebekeye entegre paralel çalışan farklı üniteler nedeniyle arıza empedansı  $Z_{th}$  düşebilir. Bu nedenle hata seviyesi artar ve bir arıza durumunda beklenmeyen yüksek hata akımları olabilir (Şekil 3). Bu durum çalışan ünitelerin bu koşullara göre tasarlanmaması nedeniyle bu üniteleri zora sokar.



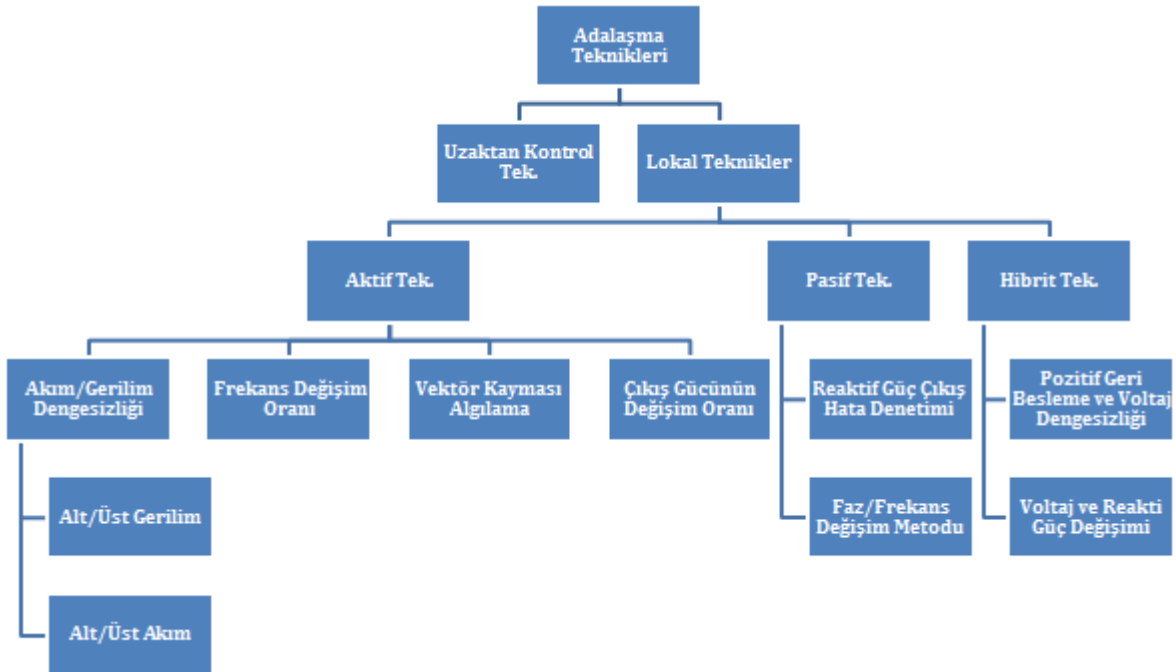
Şekil 3. Kısa devre akımı.  $I_{dg}$  embedded generator  $I_{hat}$  ana şebeke akımı

Bara 2 deki röle sadece  $I_h$  akımını ölçer, röle gerçek arıza akımını ölçemediği için hatalı çalışır.

Aşırı akım rölesinin zamanında devreye girmemesi yüksek empedanslı sistemlerde ciddi problemler oluşturur. Diğer yandan bara 2 de meydana gelen arıza durumun da Lokal jeneratörler arıza akımını etkiler. Kısa devre durumları incelendiği zaman geleneksel sistemden farklı olarak DG lerin kısa devre akımının genliğini, yönünü ve süresini etkilediği görülür.

### Şebeke Koruma Yöntemleri (Anti-Islanding)

Adalaşma durumunun DG koruma sistemi tarafından tespiti için **aktif ve pasif yöntemler** oluşturulmuştur (Şekil 4). Pasif metotlarda sistem verileri pasif yöntemlerle takip edildiğinden bu yaklaşımın enerji güc kalitesi üzerinde olumsuz etki barındırmaz. Aktif koruma ise daha doğru sonuçlar oluşturursa da, sisteme bazı sinyaller enjekte ettiklerinden küçük oranlarda da olsa güç kalitesini olumsuz etkileyebilir.



Şekil 4. Şebeke Koruma Yöntemleri (Anti-Islanding)

Solar (PV) sistemler için de geçerli olan adakarşıtı modunu da kapsayan uluslararası test standartları belirlenmiştir (Friedman. N.R. 2002) (Ye Ez et all 2003) (Geidl M. 2005) (Electricity Council G59 1985). Türkiye’ de geçerli olan bu standartlarda, sıradışı şebeke durumlarında solar (PV) invertör tepkileri ve fonksiyonları belirlenmiştir.

### Pasif Koruma Yöntemleri

Pasif Koruma yöntemleri aşağıdaki gibidir.

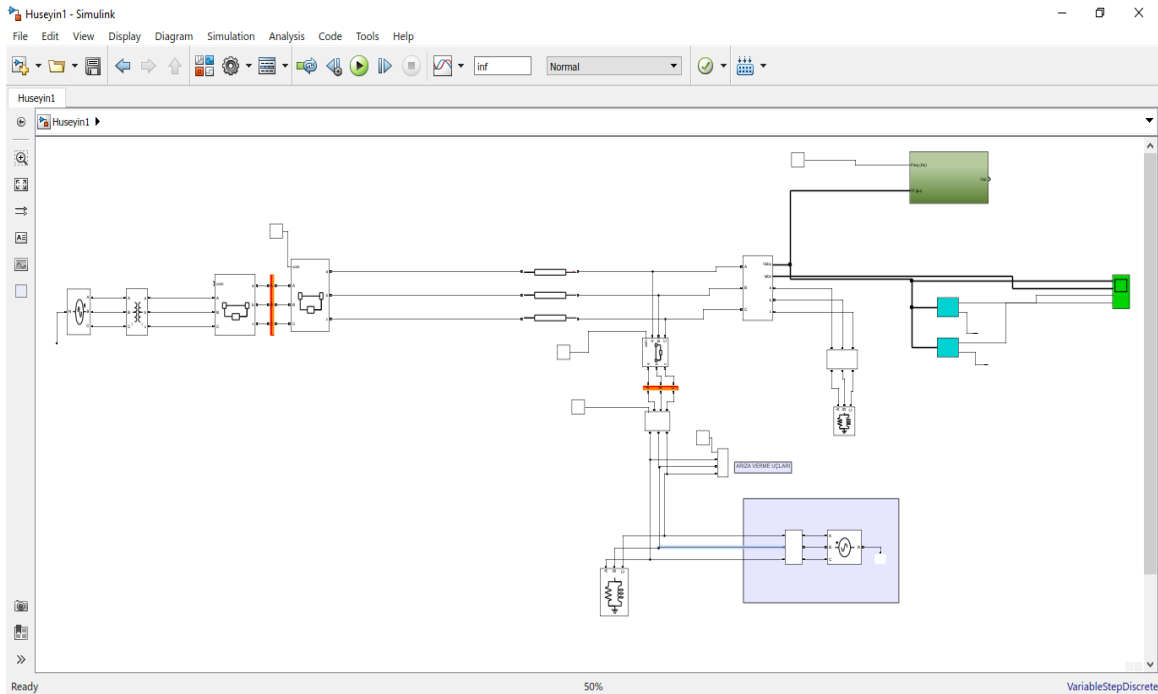
1. Voltaj-Akım-Frekans Dengesizlik Rölesi
2. Vektör Dalgalanma Tespit Rölesi
3. RoCoP Çıkış gücünün değişim oranı

Rölesi

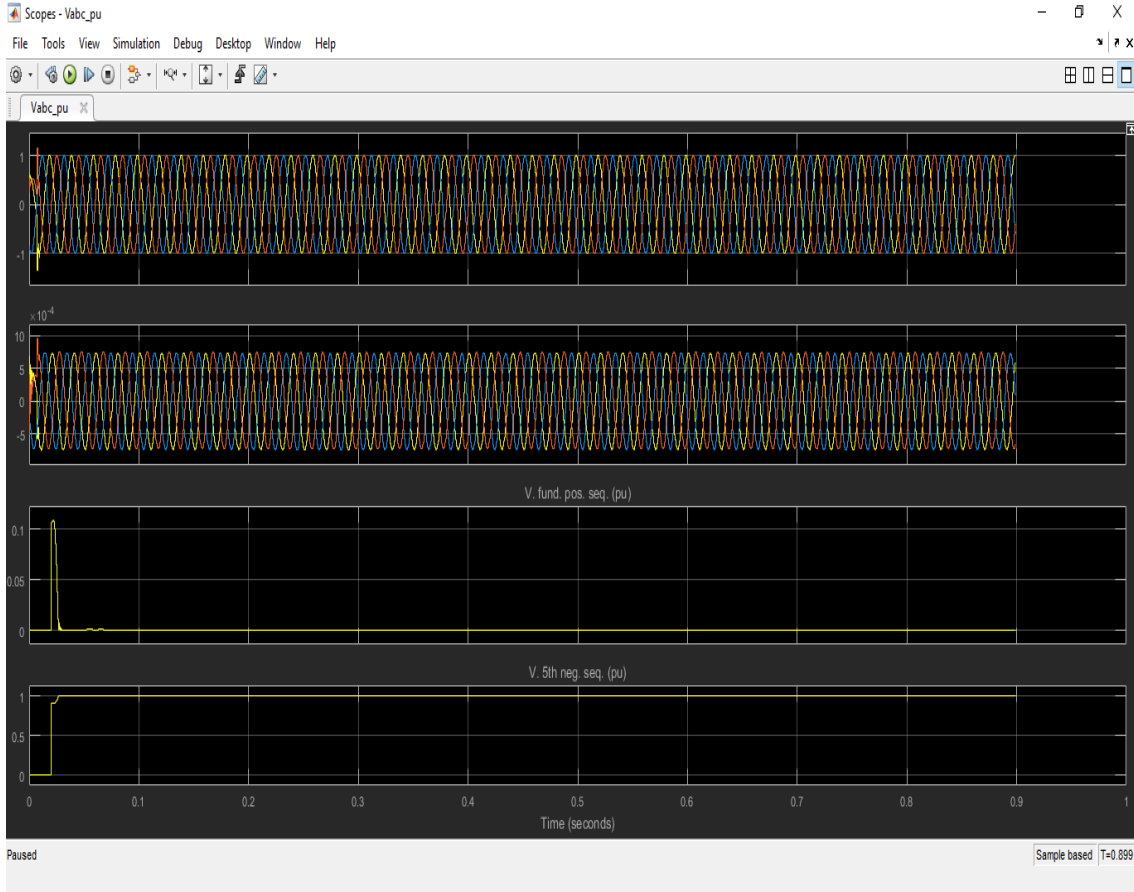
4. RoCoF Frekansın değişim oranı Rölesi

### Bulgular ve Yorum

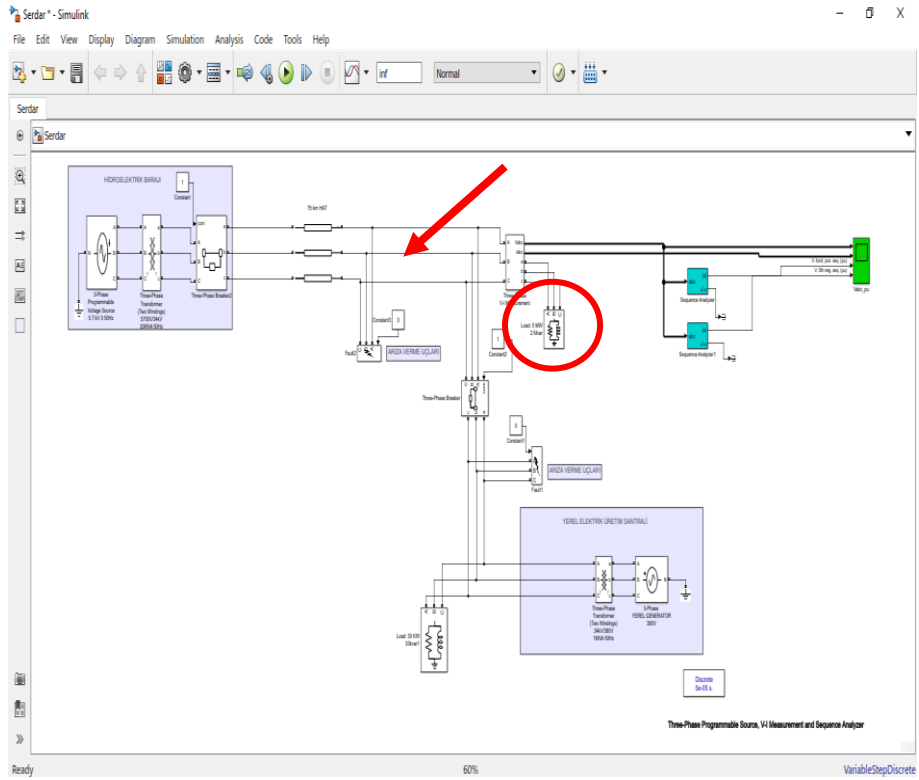
Çalışmada Adalaşma durumu MATLAB Simulink programı ile simüle edilip, farklı arıza durumlarına göre oluşturulan seneryolar sonucunda yük ile pv sistemin farklı durumlarına göre (lokal yükün yerel santral gücünden fazla ve az olma durumları) (Şekil 5, Şekil 7 ve Şekil 9) ana şebekenin ayrılması sonucunda oluşan adalaşmanın simülasyon sonuçları Şekil 6, Şekil 8 ve Şekil 10’da görülmektedir.



Şekil 5. Şebeke ve DES in birlikte çalışması MATLAB SIMULINK

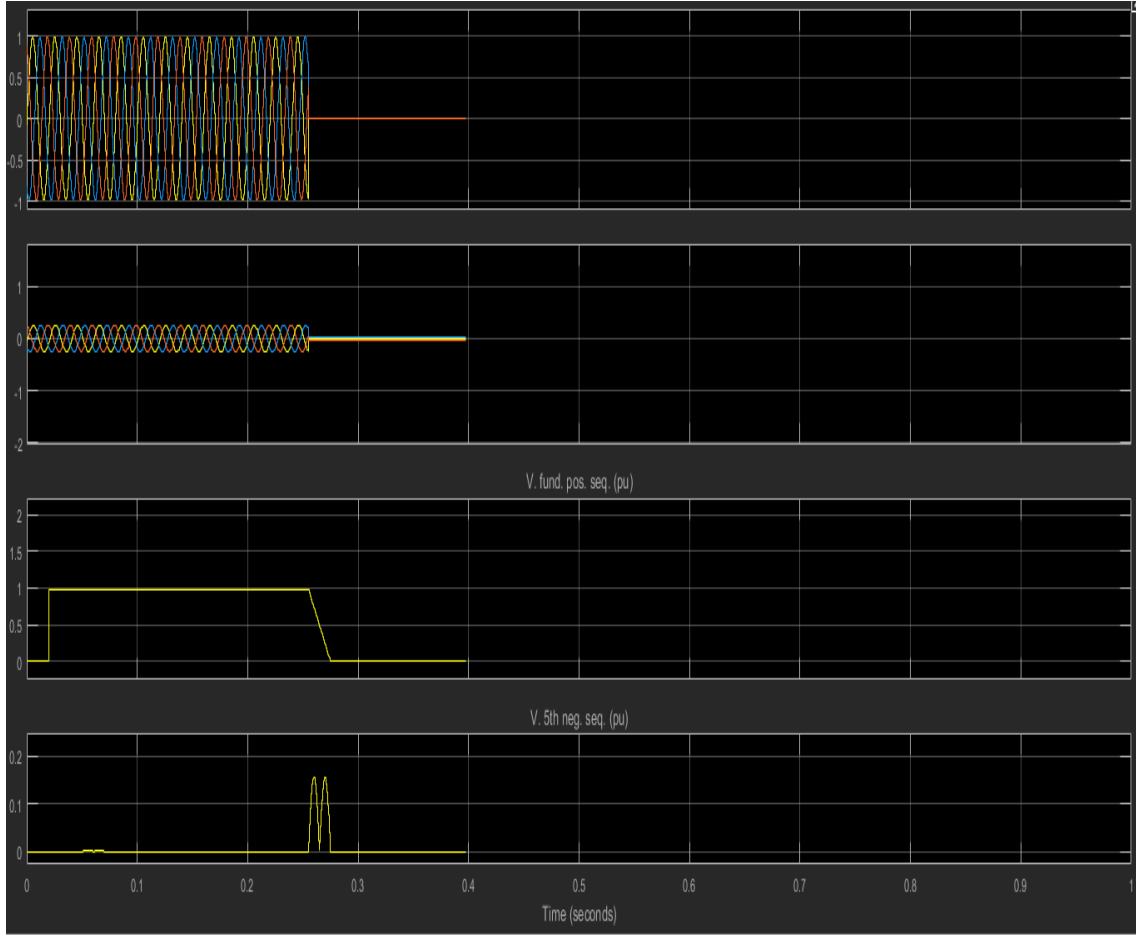


Şekil 6- Şebeke ve DES in Birlikte Çalışırken Akım Gerilim Grafiği MATLAB SIMULINK

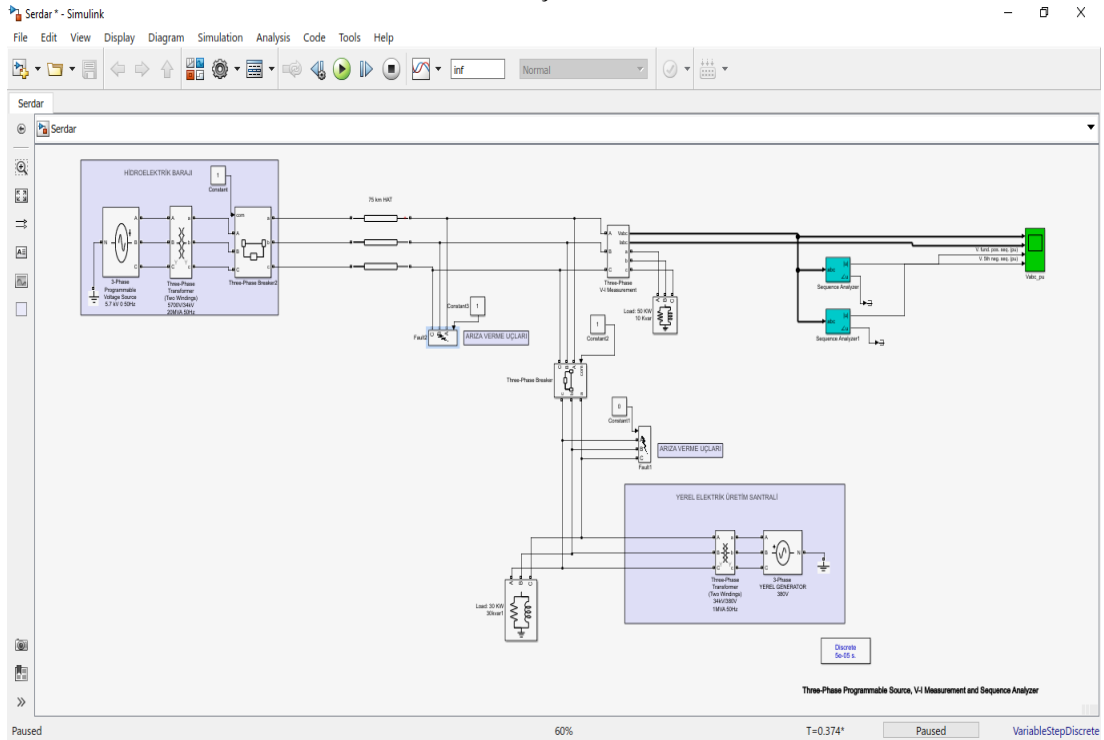


Şekil 7- 3 Fazlı yüklü Devre üzerinde arıza noktası

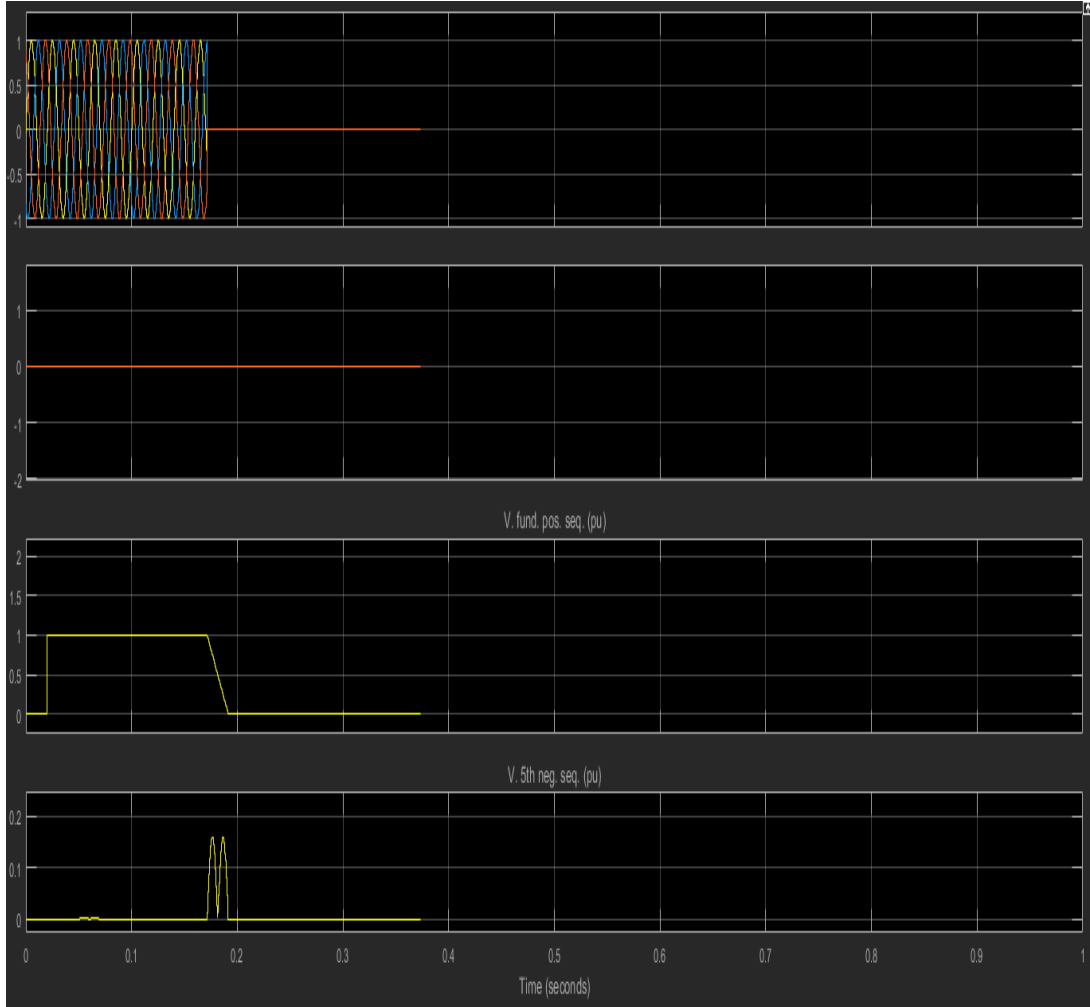




Şekil 8- Orta Gerilim Ana Şebekede de 3 Faz Toprak Arızası meydana gelmesi ve Fazla Yük ile ölçüm



Şekil 9. Düşük yüklü Devre üzerinde arıza noktası



Şekil 10- Orta Gerilim Ana Şebekede de 3 Faz Toprak Arızası meydana gelmesi DÜŞÜK Yük ile ölçüm

## Sonuçlar ve Tartışma

İletim seviyesinde ana şebeke ile paralel çalışan Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santrali olası 3 faz arızaları sonucunda meydana gelecek adalaşma örneklerindeki, farklı akım-gerilim değerleri Matlab Simulink programıyla tasarlanarak grafiklerde bu arızalara ait akım ve gerilim değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre koruma sistemi oluşturulmuştur.

Bu çalışmada, şebekeye entegre olan Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santralinin Matlab simülasyonu ile oluşturulan sistemde, meydana gelecek olası arızalar sonucunda oluşabilecek adalaşma problemi tespit edilmiş ve oluşacak bu probleme karşın mutlaka etkili bir koruma sisteminin oluşturulması önerilmiştir. Buna ek olarak Dicle Üniversitesi Güneş Enerji Santrali

Mühendislik Fakültesini ana şebekeyle paralel çalışırken beslediği düşünerek üretimden yükün az olduğu ve üretimden yükün fazla olduğu senaryoları oluşturulmuş ve buna göre akım-gerilim değerleri elde edilmiştir.

Dünyadaki gelişen bireysel yerel enerji santralleri için, ülkelerin kendi enerji sistemlerinin karakteristik değerlerine göre koruma sistemleri oluşturulmaktadır. Bu bağlamda öncü bir grup liderliğinde gerekli ARGE çalışmaları yapıp Türkiye' nin kendi koruma standartlarını oluşturması kaçınılmazdır.

Ülkemizde sayıları hızla artan dağıtık üretim santrallerinin enerji kalitesine ve maliyetine olumsuz etki sunmaması için kendi sistemine göre kurallar ve koruma sistemleri dizayn

edilmelidir. Bu nedenle özellikle röle mühendislerine ve bu konuda çalışan araştırmacılara çok iş düşmektedir. Bu çalışmaların belli bir koordinasyon gurubu önderliğinde hızlıca oluşturulması olası negatif problemleri çözmek için gereklidir.

## Kaynaklar

- Barker P.P. and Mello R.W.. De Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems. In IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, volume 3, pages 1645– 1656 vol. 3, 2000.
- Clark H K & Feltes J W, “Industrial and Co-generaiton Protection Problems Requiring simulation.” IEEE Trans. on industry Applications, Vol.21,No. 1, pp 69-80, Jan./Feb 1985
- Dağıtım tesislerine bağlanacak üretim santralleri için fider kriterleri ,TEDAŞ
- Electricity Association, “Engineering Technical Report” No.113 revision 1995
- Electricity Council, “Notes of Guidance fort the Protection of Private Generating Sets for Operation in Parallel with Electricity Board Distribution Networks.” Engineering Recommendation G59, London, June 1985.
- Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği, www.epdk.gov.tr
- Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, www.epdk.gov.tr
- Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, www.epdk.gov.tr
- Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, www.epdk.gov.tr
- Friedman.N.R. Distributed energy resources interconnection systems: Technology review and reserach needs. Technical Report NREL/SR560-32459, National Renewable Energy Laboratory, 2002
- Geidl M. Power Systems Laboratory Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich,
- GUO-KIANG HUNG ET AL: "Automatic phase-shift method for islanding detection

- of grid-connected photovoltaic inverters", IEEE Transactions on Energy Conversion., vol. 18, no. 1, 1 March 2003
- Kane P. O’ and Fox. B. Loss of mains detection for embedded generation by system impedance monitoring. In Developments in Power System Protection, Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 434), pages 95–98, 1997.
- Moore P J, Carranza R D & Johns A T, “A New Numeric Technique for High Speed evaluation of Power system Frequency.” IEE proc. On Generation, Transmission & Distribution, 141,5,1994,529-536
- Nguyen C T, “A New Technique for Rapid Tracking of Frequency Deviations Based on Level Crossings”, IEEE Trans. on Power Apparatus and System,Vol.PAS-103,No.8,Aug. 1984,PD.2230-2237.
- Nichols N, “The Electrical Considerations in Cogeneration.” IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.21,No.4, pp 754-761,May /june 1985.
- Piyasasında İletim ve Dağıtım Sistemlerine Bağlantı ve Sistem Kullanımı Hakkında Tebliğ, www.epdk.gov.tr
- Powell L J, “An industrial View of Utility Cogeneration protection Requirements”. IEEE Trans on IA-24. Pp 75-85, Jan/Feb 1988.
- Redfern M.A., Barrett J.I., and Usta O.. A new loss of grid protection based on power measurements. In Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434), pages 91–94, 1997.
- Salman S.K., King,D.J. and Weller G.. New loss of mains detection algorithm for embedded generation using rate of change of voltage and changes in power factors. In IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, pages 82–85, 2001. 98
- Usta Ö, Erdoğan Z ve Bayrak M “Yerel Elektrik Santrallerinde Koruma ve Kontrol Problemleri” 6. Ulusal Kongre Bursa, 1995
- Waine S A, Tindall C E & Clay W, “Frequency Tracking for Power Control.” IEE Proc. On Generation, Transmission and

- distribution, Vol. 133, Part C, No.2, Mar.1986,pp. 95-98
- Warin J W, 'Loss of Mains Protection.' ERA Conferance: Circuit protection for Industrial and Commercial Installation, London 1990.
- Warin J. W. Ailen W.H.,1981, Loss of Mains Protection, California Edison Company,1981.
- Woodbury F A, "Grounding Considerations in Cogeneration." IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 21, No. 6, pp 1523-1532,Nov./Dec. 1985.
- Woodworth M "Co-generator(CHP) view point" (Engineering Manager, Combined Power Systems), 15/10/1996
- Ye Z. et al Testing of GE universal interconnection device. Technical Report NREL/TP-560-34676, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- Woodbury F A, "Grounding Considerations in Cogeneration." IEEE Trans. on Industry

## **A new approach to rate of change of frequency relay preventing islanding in local power**

### **Extended Abstract**

*With the amendment within the scope of Article 14 of the Electricity Market Law dated 14/3/2013 and numbered 6446, many local power plants would be installed or will be established and operational in parallel with the electricity networks. With the recent amendments to the law, the establishment and commissioning of many local power plants are continuing. In addition to the major contribution of these power plants to energy production, they create various problems for technical personnel and other consumers during their parallel operation with the grid. In this study, firstly, the connection of Dicle University Solar Power Plant with Main Grid was modeled in Matlab simulation environment and data obtained against possible failures were observed. Later, different scenarios that will occur in case the Power Plant, which works in parallel with the Main Network, feeds the Faculty of Engineering are designed in the simulation environment and the results of these simulations are evaluated.*

*Today, population growth and developments in electrical-electronic technology increase the dependence of the societies in the world and our country on electrical energy. The depletion of fossil fuels and environmental problems have encouraged all countries in the world to use alternative energy sources. These developments have led to the restructuring of traditional electrical energy systems.*

*Distributed Generation (DG) or Embedded Generation (Individual Local Power Plants embedded in the traditional system) is a concept connected with the traditional network system due to the high number and connection points. Individual local generation plants are defined as Distributed Generation plants that are connected in parallel with the Main grid at the connection points. DG plants cause double-sided load flow as opposed to the traditional system and become part of the interconnected system.*

*Active and passive methods have been established for the determination of the islanding state by the distributed generation protection system. Since passive methods are followed by outside data from relays, this approach has no negative effect on energy power quality. Active protection, on the other*

*hand, may produce a more accurate result, however, because it injects some signals into the system, it may adversely affect power quality, even in small amounts.*

*This paper presents modeling and simulation of the grid-connected Dicle University PV generation system under MATLAB/Simulink. Firstly, In this study, possible fault conditions are designed by Matlab simulation of Dicle University Solar Power Plant integrated to the grid. Different cases are simulated, and the results have verified the validity of models and control schemes.*

*The current, voltage results obtained from different systems created with Matlab Simulink program were evaluated for the islanding samples that will occur as a result of the parallel operation of the Dicle University Solar Power Plant at the transmission level and possible 3 phase failures.*

**Keywords:** *Distributed Generation , Rocof , Islanding , Embedded Generation.*



## Comparative assessment of five metaheuristic methods on distinct problems

Ali Mortazavi <sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Ege University, Graduate School of Natural and applied Sciences, Ph.D, Izmir, Turkey, ORCID iD: 0000-0002-6089-7046

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 02.07.2019

Received in revised form 19

September 2019

Accepted 20 September 2019

Available online 26 September 2019

#### Keywords:

*Optimization techniques,  
Metaheuristic algorithms,  
Constrained optimization problems*

Doi: [10.24012/dumf.585790](https://doi.org/10.24012/dumf.585790)

### ABSTRACT

Metaheuristic algorithms belong to the non-gradient based optimization methods. Accomplished studies in this area reveal that each of these methods mostly has its own affirmative and inconvenient aspects. So that, one might provide a high level of exploration while the other can perform a great level of exploitation. Thus, selecting the proper and efficient algorithm for a problem can highly affect both the convergence rate and the accuracy level. There are several different metaheuristic algorithms have been announced in the technical literature in the last decade. Therefore, performing an objective comparative assessment over some of these methods can provide a fundamental and fair attitude for researchers either to select an algorithm which is more fitted with their target(s) or to develop even more efficient methods. So, the current investigation deals with evaluating and comparing of five different metaheuristic techniques emerged from ten years ago up to now. The selected methods can be sorted chronologically as Firefly Algorithm (FA), Teaching and Learning Based Algorithm (TLBO), Drosophila Food Search (DSO) method, Ions Motion Optimization (IMO) and Butterfly Optimization Algorithm (BOA). Different properties of these algorithms as convergence rate, diversity variation, complexity and accuracy level of the final solutions are compared on both constrained and non-constrained optimization problems include mathematical functions, mechanical and structural problems. The results show that the cited methods show different performance depending on the type of the optimization problem but overallly BOA and TLBO outperform the other algorithms on non-constrained and constrained problems, respectively.

\* Corresponding author

Ali, Mortazavi

✉ e-mail: [ali.mortazavi.phd@gmail.com](mailto:ali.mortazavi.phd@gmail.com)

## Introduction

In several science and engineering fields the main purpose of designing process is to establish the system with maximum efficiency and minimum cost [17-19]. Thus, the design problems somehow are convertible to an optimization problem and consequently optimization techniques play vital role on solving these problems. Optimization techniques can be divided into two main categories as deterministic and non-deterministic algorithms. Deterministic approaches indicate those methods that are based on mathematical modeling and programming techniques [7]. These approaches while initiate the search process from an initial design point by computing the gradient of the objective function explore the search space toward the optimum point. Despite the fact that such approaches have a fast convergence rate and high accuracy, they are highly dependent to the starting point and also they require a continues (or partial continues) objective function and its gradient(s). However, for many of engineering problems finding such an objective function is very difficult or even impossible [19].

So, to overcome these shortcomings another class of methods seems to be required. In this regard the non-deterministic approaches as an alternative optimization approach are emerged [10,24,25,30]. These class of optimization approaches do not entail gradient information of the problem's objective function and/or its constraints, if any [16,17,21]. They typically use probabilistic rules of transition rather than deterministic ones. They employ a number of randomly generated agents, and gradually improve them until the convergence/termination condition is met. Metaheuristic approaches, as main the techniques belong to this group, generally are inspired from natural phenomena. The basic clue behind these methods is to model natural concepts, like survival behavior of the animal colonies, physical rules and etc. [20]. Since these methods are numeric based, along with developments of the computers usage of these algorithm on different class of optimization problems are highly gained interest among the researchers [15,19].

It should be taken into account that there is no any unique manner or a standardized algorithm to

implement of different metaheuristic approaches to solve different problems. Two important search behaviors which highly affect the search performance of the algorithm are exploration and exploitation of the algorithm. To spot the level of these behaviors and the ability of an algorithm to provide a suitable balance between these two different behaviors, the algorithm should be verified on different problems with various specifications. To meet this aim in the current study five well-stablished metaheuristic algorithms (based on the author's knowledge) are taken into consideration. It should be noted that, the investigated methods on this study are chosen to cover a recent decade innovations and achievements (from 2009 up to 2019) in the field of metaheuristic optimization techniques. These algorithms hierarchically can be sorted as Firefly Algorithm (FA) presented in 2009 by Yang [29], Teaching and Learning Based Optimization (TLBO) introduced in 2011 by Rao et al. [22], Drosophila Food Search (DSO) present in 2014 by Das and Singh [4], Ion Motion Algorithm (IMO) presented in 2015 by Javidy et al [8] and Butterfly Optimization Algorithm (BOA) presented in 2019 by Arora and Singh.

FA method imitating the firefly's mating behavior to search the domain and it used in several research works [11,14]. TLBO is modeled the educational relation between students and teacher in the classroom, this method and its modified versions also is utilizes as the optimizer tool in many different works [3,5,13,23,27,28]. DSO method models the food search strategies of the insect with the same name to search the problem domain [4]. This method uses two different patterns to globally and locally search the domain. IMO mathematically models the interactions between ions of the material in the liquefied and solid phases [6], and finally BOA method as the most recent method imitating the mating behavior of butterflies to provide a search algorithm.

Cited five algorithms' search capability are tested on variety of problems belonged to the mathematical, mechanical and structural fields. They are included both constrained and non-constrained search spaces with continuous and discrete variables. The methods different aspects like convergence rate and diversity index, complexity level and accuracy of the solution are

verified on cited various classes of optimization problems and the results are provided via illustrative tables and comparative diagrams. The achieved results show that TLBO approach overlay shows a steady performance on searching the domain of different problems, while BOA demonstrates significant converging ability on non-constrained problem.

### Optimization algorithms

This section is devoted to describe the methods that their search performances are investigated. All of these methods are metaheuristic algorithms. They are all population based algorithms which are started from an initial random agent while each agent is the candidate solution. These agents are gradually improved based problem according to the predefined pattern of the considered optimization algorithm. Assessment of the agented are done iteratively via evaluating the given objective function of the problem. Consequently, the applied methods in this study are briefly explained in the following.

#### Firefly Algorithm (FA)

The firefly algorithm (FA) is originally introduced by Yang [29], this method drives its search patterns form the behavior of the fireflies in the real world. It is inspired from the flashing behavior of fireflies and its absorbing effect on their own species. Although the real behavior of fireflies might be complex, to get a mathematical model the idealizations are made as follows:

- All fireflies are considered as unisex species; it means that all of them regardless to their sexuality they can be attracted to each other.
- The attractiveness factor directly proportional to their brightness. Therefore, for any pair of fireflies the brighter is more attractive and consequently the less bright firefly will move toward it. Also, this attractiveness depends on the distance between them, so it is decreased when the distance of two fireflies is increased and vice versa. On the other words if a firefly stands so far from

others, it is not attracted by any of them and so it performs a random movement.

- The landscape of the objective function of the optimization highly affects the brightness of the fireflies (e.g. in the foggy weather even close fireflies may not realize each other).

Based on this information the two important terms in the firefly algorithm are light intensity of the agents and proper formulation to devote the attraction level of the agents. Since attraction of other fireflies to the light intensity of current firefly is depended to their distance, it can be defined via exponential function as below:

$$\beta(r_{ij}) = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} \quad (1)$$

where,  $r_{ij}$  indicate the distance between a pair of fireflies and can be defined as Euclidean distance as  $r_{ij} = \|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\|$  and  $\beta_0$  and  $\gamma$  indicate the attractiveness level for the  $r_{ij}=0$  state and light absorption coefficient, respectively. Consequently, based on the given information the movement of the fireflies is mathematically formulated as follow:

$$\Delta \mathbf{x}_i = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + \alpha \left( \text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_i^{t+1} = \mathbf{x}_i^t + \Delta \mathbf{x}_i$$

where, superscript  $t+1$  and  $t$  show the updated location of the firefly, respectively. Also,  $\alpha$  is random number uniformly generated from  $[0,1]$  interval and 'rand' provides a vector of random number selected from  $[0,1]$  interval and  $\beta_0=1$  is set [29]. Finally, to provide more clarity the pseudo code for FA is given as below:



Table 1. The pseudo code for FA

---

```

Initialize internal algorithm parameters;
Generate n random firefly;
Light intensity  $I_i$  at  $\mathbf{X}_i$  is determined by  $f(\mathbf{X}_i)$ 
while (not termination condition)
  for (each agent  $i$ )
    for (each agent  $j$ )
      if ( $I_j > I_i$ ), firefly  $i$  should move towards firefly  $j$ 
    end
    Adjust attractiveness according to distance  $r$  via
     $\exp[-\gamma r]$ 
    Evaluate new solutions and update light intensity
  end
end
end

```

---

### Teaching and learning based optimization algorithm (TLBO)

The teaching and learning based optimization inspired from the knowledge flow inside a classroom was presented by Rao et al. [22]. This method considers the teacher educational influence on the students. Similar to other natural-inspired algorithms TLBO is a population based method that starts with a random class which contains possible solution candidates. These random candidates are called learners. This algorithm is two phase method which includes teaching phase and learning phase. The first phase focuses on the knowledge transferring from teacher to the learners while second phase models the learning process among the student through their individual interactions.

In the teaching phase all agents are evaluated based on their objective function values and the best agent is selected as the teacher. Then all agents are modified their locations based on mean knowledge level of the classroom. If the updated solution is better than prior one the new one is accepted and otherwise it is rejected. Subsequently, in the learning phase a random pair of students is selected and the student (agent) with lower level of knowledge moves toward the other with higher level of knowledge. Again if updated location is better than the previous one it is accepted and else it is rejected. Based the given information TLBO method is mathematically formulated as follow:

$$\mathbf{X}^{(new,i)} = \mathbf{X}^i + r(\mathbf{X}_{teacher} - T_F \mathbf{X}_{mean}) \quad (3)$$

if  $f(\mathbf{X}^{(new,i)}) < f(\mathbf{X}^i)$   $\mathbf{X}^i = \mathbf{X}^{(new,i)}$

$$\text{if } f(\mathbf{X}^{(new,i)}) \geq f(\mathbf{X}^i) \quad \mathbf{X}^i = \mathbf{X}^i$$

where,  $\mathbf{X}^{(new,i)}$  is the updated position of  $i^{\text{th}}$  agent,  $\mathbf{X}^i$  is its current location, the teaching factor is shown with TF and can be either 1 or 2 also  $f(\mathbf{X}^{(new,i)})$  and  $f(\mathbf{X}^i)$  show updated and the current objective values of  $i^{\text{th}}$  agent, respectively.

Also,  $\mathbf{X}_{mean}$  is the mean of all agents and it is formulated as follow:

$$\mathbf{X}_{mean} = \left[ m \left( \sum_{j=1}^{np} x_j^1 \right), m \left( \sum_{j=1}^{np} x_j^2 \right), \dots, m \left( \sum_{j=1}^{np} x_j^{nd} \right) \right] \quad (4)$$

in which,  $np$  shows the number of the students,  $m(\cdot)$  returns the mean value of any inputs and  $nd$  indicates the problem dimension. The learning phase mathematically is formulated as follow:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^{(new,i)} &= \mathbf{X}^i + r \cdot (\mathbf{X}^i - \mathbf{X}^j) & \text{if } f(\mathbf{X}^i) \leq f(\mathbf{X}^j) \\ \mathbf{X}^{(new,i)} &= \mathbf{X}^i + r \cdot (\mathbf{X}^j - \mathbf{X}^i) & \text{if } f(\mathbf{X}^i) > f(\mathbf{X}^j) \end{aligned} \quad (5)$$

Where,  $r$  is the random value and  $\mathbf{X}_i$  and  $\mathbf{X}_j$  are two different member of the population. If  $\mathbf{X}^{(new,i)}$  improves the objective value, it is accepted otherwise it is rejected and  $\mathbf{X}_i$  is maintained. For more clarity, the pseudo code for TLBO is provided as follow:

Table 2. The pseudo code for TLBO

```

Generating n random agents
while (not termination condition)

Sort the colony and selected the best agent as teacher
for (each agent i)
    update each agents location considering teacher position via Eq. ( 4 )
    evaluate updated agent (f(Xi))
    if new location of agent i is improved
        maintain new location
    else
        reset it to its prior best location
    end
    select random jth agent which (i≠j)
    if new location of agent i is better than agent j location
        agent i getting away from the agent j based on Eq.( 5 )
    else
        agent i going toward from agent j based on Eq.( 5 )
    end
    evaluate updated agent (f(Xi))
    if new location of agent i is improved
        maintain new location
    else
        reset it to its prior best location
    end
end
end
    
```

Teaching Phase

Learning Phase

[1, D] as tow random numbers Also,  $V_{i,k}$  and  $V'_{i,j}$  are the current and updated agent’s location. the Modified Quadratic Approximation (MQA) search approach is mathematically formulated as follow:

$$Child = 0.5 \frac{(R_2^2 - R_3^2)f(R_1) + (R_3^2 - R_1^2)f(R_2) + (R_1^2 - R_2^2)f(R_3)}{(R_2 - R_3)f(R_1) + (R_3 - R_1)f(R_2) + (R_1 - R_2)f(R_3)} \quad (7)$$

in which  $f(.)$  indicates the objective function value for any individual and  $R_1, R_2$  and  $R_3$  are slected randomly among the colony so that  $R_1 \neq R_2 \neq R_3$ . For more clarity, the pseudo code for DSO is provided in Table 3.

Table 3. The pseudo code for DSO

```

Initialize internal algorithm parameters;
Evaluate fitness of each individual in the populations
while (not termination condition)
    Use tournament selection
    for (each agent i)
        For each agent in the population make the neighborhood search using Eq. (6) and update it
        Evaluate objective function of each member f(Xi) using Eq. (6)
        The best place of agent is saved
        If the fitness of any agent and its old position is within 1% radius, then apply MQA using Eq. (7)
        The old individual will only retain its position if it is better than the current individual
    end
end
    
```

### Drosophila search algorithm (DSO)

The Drosophila Search Algorithm (DSO) is the metaheuristic search approach which imitates the food search behavior of the insect with the same name as Drosophila Melanogaster. The method is population based approach and it was released for the first time by Das and Singh [4]. In this approach two main strategies are applied to search the problem domain as neighborhood food searching and Modified Quadratic Approximation (MQA). The neighborhood food searching is formulated as below:

$$U_{i,k} = V_{i,k} + |V_{r3,k} - V_{r4,k}|$$

$$W_{i,k} = V_{i,k} + |V_{r3,k} - V_{r4,k}| \text{ for } k = r1 \text{ and } r2;$$

for  $j \neq r1$  and  $j \neq r2$ ,  $U_{i,k} = V_{i,j}$  and  $W_{i,j} = V_{i,j}$  (6)

$V'_{i,j} = \text{Min}\{f(V_{i,j}), f(U_{i,j}), f(W_{i,j})\}$  for  $\begin{cases} i = 1, 2, \dots, P \\ j = 1, 2, \dots, D \end{cases}$  where,  $i \in \{1, 2, \dots, P\}$  and  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  which  $P$  and  $D$  values are the population size and problem dimension, respectively.  $r1, r2 \in$

### Ions Motion Optimization (IMO) Algorithm

The Ions Motion Optimization (IMO) mimics the ions behavior in nature, indeed it is inspired from repulsion and attraction force between cations and anions. This algorithm has two different navigation schemes as liquid and solid to guidance the agents. It is considerable that the algorithm of IMO has not any random coefficient in its main phase (i.e. liquid phase). So, in the liquid phase all agents (ions) are move toward each other non-stochastically. Also, since all of initial population are divided into two main groups of ions as anions and cations the population size should be an even number. In the solid phase agents are navigated toward (or around) the best solution to provide exploitation. Based on the method’s authors this phase preventing from local optima trappings [8]. Based on provided information the liquid and solid phases of IMO respectively are formulated as below:

Liquid phase

$$A_{ij} = A_{ij} + AF_{ij} \times (Cbest_j - A_{ij})$$

$$C_{ij} = C_{ij} + CF_{ij} \times (Abest_j - C_{ij})$$

Solid phase

$$\text{if} \left( \begin{array}{l} CbestFit \geq \frac{CworstFit}{2} \\ \text{and} \\ AbestFit \geq \frac{AworstFit}{2} \end{array} \right)$$

$$\text{if } rand() > 0.5$$

$$A_i = A_i + \Phi_1 \times (Cbest - 1)$$

else

$$A_i = A_i + \Phi_1 \times (Cbest) \tag{8}$$

end if

$$\text{if } rand() > 0.5$$

$$C_i = C_i + \Phi_2 \times (Abest - 1)$$

else

$$C_i = C_i + \Phi_2 \times (Abest)$$

end if

$$\text{if } rand() < 0.05$$

Re – initialized  $A_i$  and  $C_i$

end if

end if

where  $Cbest$  and  $Abest$  are shown the best cation and anion, respectively. Also,  $\Phi$  is the random number uniformly selected from interval of [0,1].  $CbestFit$  and  $AbestFit$  are indicated the fitness values for the best cation and anion, respectively.  $AF_{ij}$  and  $CF_{ij}$  are force coefficient between ions and they are defined as follows:

$$AF_{ij} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/AD_{ij}}}$$

$$CF_{ij} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/CD_{ij}}}$$

(9)

In which,  $AD_{ij} = |A_{ij} - Cbest_j|$ ,  $CD_{ij} = |C_{ij} - Abest_j|$  are distance between  $i^{th}$  agent and best cation and best anion, respectively. for more clarification the pseudo code for IMO is given as follows:

Table 4. The pseudo code for IMO

---

Initialize internal algorithm parameters and random population;

**while** (not termination condition)

Fitness evaluation of all agents

Determine the best and worst Anions and Cations

Determine force factor using Eq. ( 9 )

Update locations of ions based on the liquid phase as given in Eq. ( 8 )

**if** (Mean fitness of worst ions are equal or smaller than the best ions)

Perform solid phase motion based on the Eq. ( 8 )

**end**

**end**

---

**Butterfly Optimization Algorithm (BOA)**

The butterfly optimization algorithm models the biological behavior of the butterflies to find food sources and mating. This method has three main phases as initializing, main iterations and finalizing [2]. The created model can be idealized as follows: (a) It is supposed the all butterflies are able to emit the fragrance which causes butterflies attract to each other, (b) each butterfly provides a stochastic movement toward the best butterfly (i.e. the butterfly emitted most intense fragrance), (c) landscape of the search domain affect the level of stimulus intensity of each butterfly. For global and local searches, BAO applies two similar but different strategies as given in following:

*Global search*

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \times g^* - x_i^t) \times f_i \tag{10}$$

*Local search*

$$x_i^{t+1} = x_i^t + (r^2 \times x_j^t - x_k^t) \times f_i$$

where,  $t+1$  and  $t$  are shown the current and updated condition for the related variable. Also,  $g^*$  indicates the best agent in the colony while  $x_j$  and  $x_k$  are two randomly selected agents from the colony. The coefficient of  $r$  is a random number uniformly selected from [0,1]. The fragrance factor is defined as below:

$$f = cI^a \tag{11}$$

where,  $f$  is the magnitude of the fragrance and  $I$  is the intensity of the stimulus and  $a$  is the value that accounts the fluctuating absorption degree. Also,  $a$  coefficient can take values between [0,1] and  $c$  can be selected from interval of [0, ∞]. However, the based on presenters of BOA the

proper values for both of these coefficients are selected in range of [0,1]. For more clarity the pseudo code for BOA are given as below:

Table 5. The pseudo code for BOA

---

```

Initialize internal algorithm parameters
Generate n random butterflies
Calculate  $F(X_i)$  to determine stimulus intensity  $I_i$ 
Define sensor modality  $c$ , switch probability  $p$  and power exponent  $a$ 
while (not termination condition)
  for each population (butterfly)
    Using Eq. ( 11 ) calculate the fragrance for current butterfly
  end
  Select the best agent
  for each butterfly in the colony
    Generate rand number  $r$ 
    If  $r < p$  then
      Moving toward the best solution using global search of Eq. ( 10 )
    else
      Perform a random movement using local search of Eq. ( 10 )
    end
  end
end

```

---

### Numeric problems

In this section the different perfections and deficiencies of the addressed five metaheuristic algorithms are comparatively tested on a number of numeric mathematical and mechanical problems. These problems are covered both constrained and non-constrained cases. It should be noted that the main aim of the current work is not to make a fine tuning on any of cited algorithms over different types of problems, but their original and well established forms are applied to provide a fair comparison. To illustrate more details about these algorithms the internal terms' values are given as follow:

Table 6. Parameters values for utilized algorithm

Algorithm	Parameter values
FA [29]	$\alpha=0.25, \beta=0.2, \gamma=1$
TLBO [22]	TF = round[1 + rand(0, 1){2 - 1}]
DSO	-
IMO [8]	-
BOA [2]	$p=0.8, a=0.1, c=0.01$

It should be mentioned that the computer codes provided by their own authors for FA and BOA published over the MathWorks<sup>®</sup> are applied. All problems are solved via the system equipped with intel CORE i7@2GHz with 16GM of RAM installed. To prevent any premature convergence all cases are run for 30 times.

### Non-constrained benchmark functions

This section is devoted to test the performance of the selected algorithms on the optimization of the non-constrained benchmark functions. In this regard five best well-known benchmark functions with different properties are selected. To provide more clarity these functions are schematically plotted in the 3D space in Table 7 and their properties are also given in this table. The first two function relatively has smooth search space which challenge the global search behavior of the tested algorithms in addition the sphere function is the multimodal and separable while the Schwefel 2.22 function is unimodal and non-separable [12]. The Ackley function is a transmitting function for testing the algorithms. Since it has smooth but with vast uniform area of search space, while it highly challenges the global search behavior of the algorithms, it also requires an admissible level of local search behavior. This function search space is multimodal and non-separable. The functions of Griewank and Rastrigin both have high number of local optima, and as can be seen from Table 7 specially the later one has very noisy search domain which makes the local search very difficult for the algorithms. The related formulation, the range and assumed dimensions for the selected functions are provided in Table 8. All algorithms run for  $10 \cdot D$  ( $D$ =dimension of the problem) number of objective function evaluation, also the error level for each example are taken as  $1E-8$  [26]. The error level indicates

the error level between achieved objective function and global optimum and it is applied as alternative termination criterion. Indeed, both the maximum number of iteration and maximum error level can be a termination criterion depending on whichever occurred first.

### Convergence analysis

All algorithms performances are examined on solving the five addressed benchmark functions given in Table 7. The related convergence diagrams for all algorithms are presented in Figure 1. For the sphere function all tested method expect IMO can reach optimal condition. As the most capable methods both TLBO and BOA show nearly the same performance with 6840 OFEs they are followed by DSO and FA with 13020 and 16440 OFEs, respectively. For the Schwefel 2.22 function BOA with 2130 OFEs outperform all other tested methods, and TLBO stands at the second place by 9000 OFEs and DSO can reach the optimal condition through 32010 of OFEs. Both FA and IMO are not able to satisfy the optimal condition for this example. For the Ackley function, BOA outperforms all other methods via 1980 OFEs and it is traced by TLBO with 8640 OFEs. However, other tested algorithms do not reach to the optimal conditions. For the Griewank function the successful methods can be sorted in ascending order as BOA, TLBO and DSO with 2130, 6180 and 11790 OFEs, respectively. This is despite the fact that IMO and FA cannot attained optimal condition. For the Rastrigin function BOA shows extreme performance among all other tested methods and it reaches to the optimal condition within just 1980 OFEs. After it TLBO with 24360 OFEs other three methods are not able to satisfy any optimal condition. Overallly looking to the obtained convergences histories for all tested methods it can be seen that BOA considerably outperforms all other methods while TLBO stands in the second place on solving the non-constrained functions. Subsequently FA, DSO and IMO methods stand in the next places, respectively.

### Diversity analysis

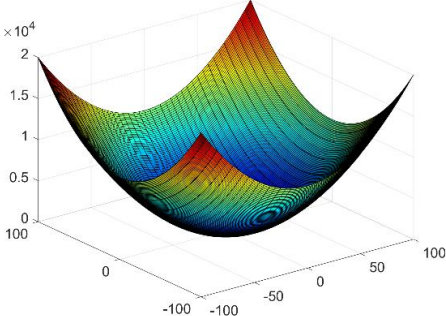
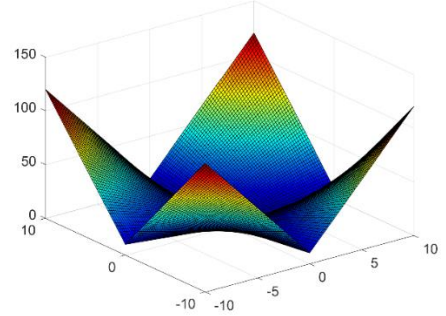
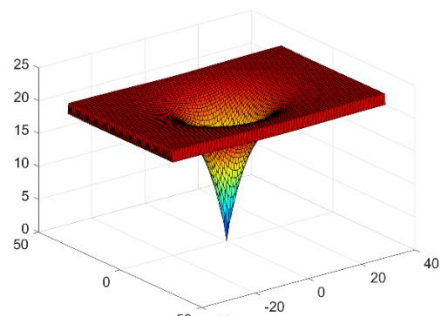
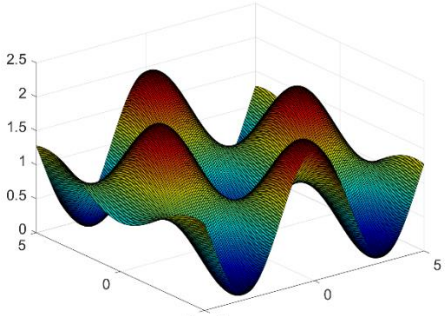
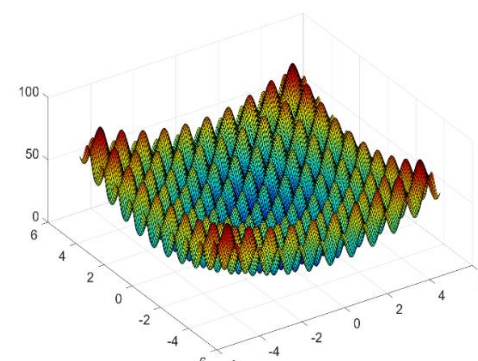
In the current section the diversity level of the selected five methods are assessed via providing

the illustrative diversity history diagrams. All swarm based methods demand an admissible level of the diversity which provides both exploration and exploitation search behaviors. With lower level of diversity, the algorithm loses its ability on explorations search and can be easily trapped into local minima and premature converge seems to be unavoidable. However, extensive level of diversity makes the algorithm to fail on achieving the required convergence, since it cannot provide an efficient search in the proximity of the local optima. To illustrate the diversity level of the selected methods their diversity history is comparatively addressed. In this regard, to measure the diversity level the diversity index is applied as follow:

$$Diversity(t) = \frac{1}{N|L|} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum_{j=1}^D (x_i^j - \bar{x}^j)^2} \quad (12)$$

where  $t$  designates the current step, number of population is shown by  $N$ ,  $L$  indicates the longest diagonal length of the search space,  $D$  stands for the problem dimension,  $x_i^j$  is the  $j^{\text{th}}$  component of the  $i^{\text{th}}$  agent, and  $\bar{x}^j$  declares the mean of the all  $j^{\text{th}}$  components for whole swarm. The corresponding diversity history diagrams of selected methods for two dimensional sphere function are given in Figure 2. As can be seen from this figure the diversity in TLBO and DSO are rapidly decreased and it means that all agents are strongly conducted toward the optimal point. Diversity level of BOA is decreased in lower rate and it seems this method can provide a mediocre level of diversity, since the convergence rate of this method is a way higher than the others. Consequently, the FA and IMO show fluctuated diversity level and if the smooth domain of the 2D sphere is considered, such a variation in the diversity is not required and these two methods don't perform an adaptive search behavior.

Table 7. Benchmark functions' schematic presentations and their specifications

	Specification*		Specification*
 <p>Sphere</p>	M,S	 <p>Schwefel 2.22</p>	U,N
 <p>Ackley</p>	M,N	 <p>Griewank</p>	M,N
 <p>Rastrigin</p>			M,S

\* M: Multimodal, N: Non-Separable, U: Unimodal, S: Seperable

Table 8. Benchmark functions' definitions

Function	Specification	Range	Dimension
Sphere	$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	[-100,+100]	30
Schwefel 2.22	$f(x) = \sum_{i=1}^n  x_i  + \prod_{i=1}^n  x_i $	[-10,+10]	30
Ackley	$f(x) = -20 \exp \left( -0.2 \times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + \exp(i)$	[-32,32]	30
Griewank	$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \left( \frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	[-600,+600]	30
Rastrigin	$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	[-5.12,+5.12]	30

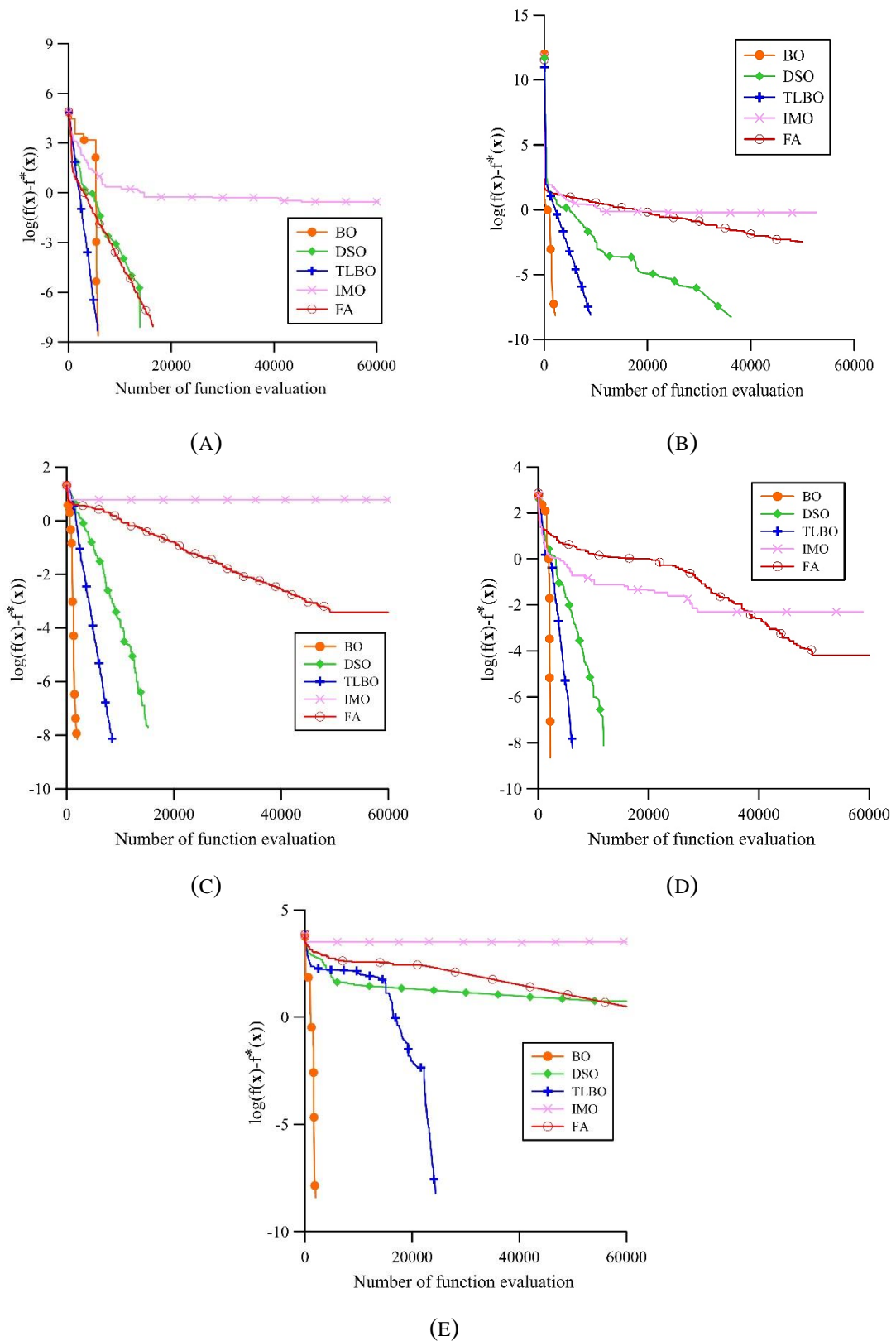
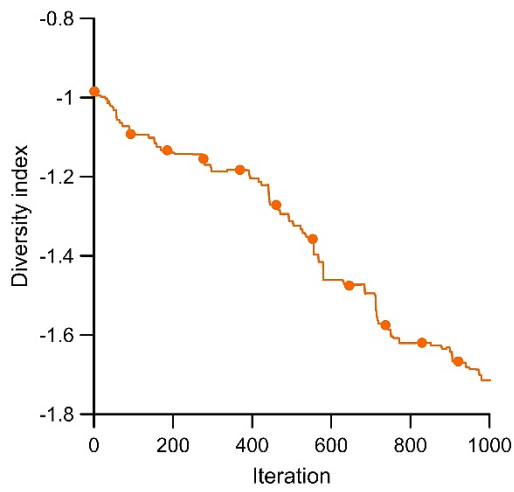
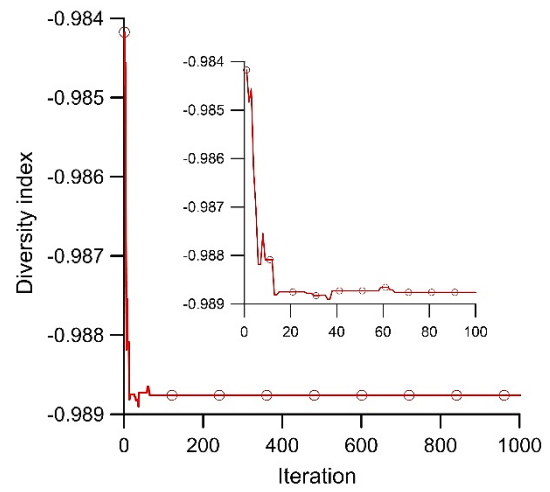


Figure 1. Convergence history for benchmark functions (a) Sphere (b) Schwefel 2.22 (c) Ackley (d) Griewank (e) Rastrigin

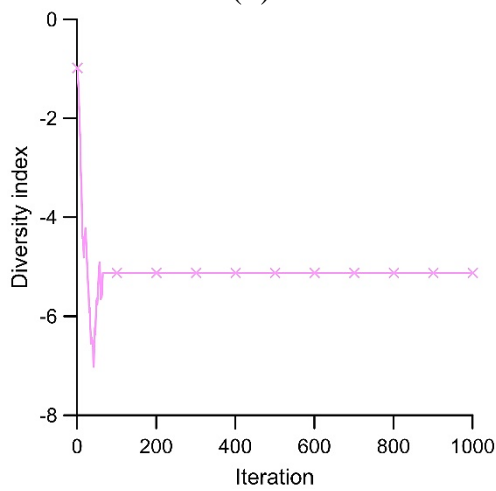




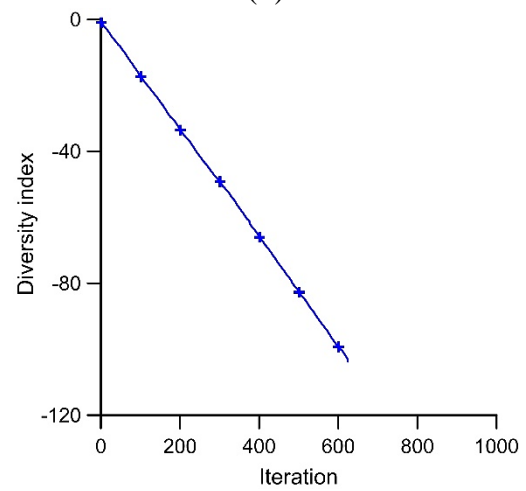
(A)



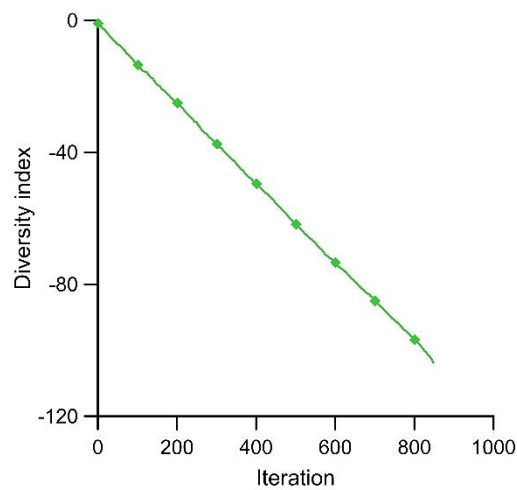
(B)



(C)



(D)



(E)

Figure 2. Diversity history for (a) BO, (b) FA, (c) IMO, (d) TLBO and (e) DSO

**Complexity analysis**

In this section the complexity level of the selected algorithms is comparatively measured. To this end, the formulation suggested in [26] is applied. Based on this formulation to measure the complexity level of an algorithm three different times as T0, T1 and  $\hat{T}2$  should be calculated as follows [26]:

- T0 should be computed via 1000000 times evaluation run time for following loop:

```

for i=1:1000000
    x= 5.55 (x is double);
    x=x + x; x=x./2; x=x*x; x=sqrt(x);
    x=ln(x); x=exp(x); y=x/x;
end
    
```

- T1 is calculated via 200000 times evaluation of a certain function, which Rastering function is selected in this study for the certain dimensions as D=30 and D=50.

- T2 is assessed via time required for complete run of the proposed algorithm over the same function and  $\hat{T}2$  is the mean value for five calculated T2 times.

The complexity level for all five algorithms are calculated on same device and the results are tabulated in Table 9 and Table 10 for Rastering function with D=30 and D=50, respectively. As can be seen from these tables TLBO method is most complex algorithm while IMO is the least complex method among all algorithms. It should be noted that in these tables the algorithms are ranked for complexity ascendingly.

Table 9. Complexity computation result for selected algorithms for D=30

Algorithm	T0	T1	$\hat{T}2$	$(\hat{T}2-T1)/T0$	Rank
FA	1.4E-01	1.9E-01	5.00E+02	3.57E+03	3
TLBO	1.4E-01	1.9E-01	6.00E+02	4.28E+03	4
DSO	1.4E-01	1.9E-01	6.67E+02	4.76E+03	5
IMO	1.4E-01	1.9E-01	3.95E+02	2.82E+03	1
BOA	1.4E-01	1.9E-01	4.60E+02	3.28E+03	2

Table 10. Complexity computation result for selected algorithms for D=50

Algorithm	T0	T1	$\hat{T}2$	$(\hat{T}2-T1)/T0$	Rank
FA	1.4E-01	3.05E-01	5.59E+02	3.99E+03	3
TLBO	1.4E-01	3.05E-01	7.14E+02	5.10E+03	4
DSO	1.4E-01	3.05E-01	8.08E+02	5.77E+03	5
IMO	1.4E-01	3.05E-01	4.01E+02	2.86E+03	1
BOA	1.4E-01	3.05E-01	4.73E+02	3.38E+03	2

**Constrained benchmark problems**

In the current section the performance of the selected methods on handling the constrained optimization is evaluated. However, since the metaheuristic approaches are non-constrained methods, to handling the constraints of the problems in this investigation the penalty function is applied as below:

$$f_{penalty}(\mathbf{X}) = (1 + \varepsilon_1 v)^{\varepsilon_2} \times f(\mathbf{X})$$

$$v = \sum_{i=1}^q \max\{0, g_i(\mathbf{X})\}$$
(13)

in which,  $f_{penalty}$  is the penalized objective function of the problem and  $f(\mathbf{X})$  is the regular objective function value and  $g_i(\mathbf{X})$  returns the  $i^{th}$  constraint's violation of the optimization problem. Also,  $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_2$  are the tuning terms of the penalty function which are taken as 1 and 1.5 while linearly increased up to 6, respectively [9]. For provide a reliable results and preventing any premature convergence the algorithms is permitted to perform 100000 number of OFEs or 500 null iterations (i.e. iteration without improving the solution) whichever occurs first.

**Pressure vessel problem**

In this section, the optimization of manufacturing cost of the pressure vessel capped in both ends with two parabolic heads shown in Figure 3 is selected as a real world constrained example. The related cost function of the problem and its constraints are formulated in Eqs. (14),(15) . This function combines both costs of the material required for components and necessary welding. The vessel system can work in the 3000 Psi condition while the vessel maximum volume should be limited up to 750 ft<sup>3</sup>. The thicknesses

of the head parts and shell bodies are restricted up to 1.1 in. and 2 in., respectively. For this problem the decision variables are set as:  $x_1$ = the shell thickness ( $T_s$ ),  $x_2$ = the head thickness ( $T_h$ ),  $x_3$ = the radius of cylindrical shell ( $R$ ), and  $x_4$ = the length of shell ( $L$ ). Achieved results for all selected methods are comparatively is tabulated in Table 11. Based on the given information TLBO and DSO can respectively attain the best solutions. After these two methods FA provides a near optimal solution. Interestingly it can be observed that despite of BOA method outperforms all other methods in the non-constrained problems, in the current constrained problem it does not show a significant performance and it stands in fourth place among all five tested methods and IMO ranked in the last place for the current problem. Also, considering statistical data TLBO with lowest value of standard deviation shows most stable behavior.

$$f(\mathbf{X}) = 0.6224x_1x_3x_4 + 1.7781x_2x_3^2 + 3.1661x_1^2x_4 + 19.84x_1^2x_3 \tag{14}$$

while it is constrained as follow:

$$\begin{aligned} g_1(\mathbf{X}) &= -x_1 + 0.0193x_3 \leq 0 \\ g_2(\mathbf{X}) &= -x_2 + 0.00954x_3 \leq 0 \\ g_3(\mathbf{X}) &= -\pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3}\pi x_3^3 + 1296000 \leq 0 \end{aligned} \tag{15}$$

$$g_4(\mathbf{X}) = x_4 - 240 \leq 0$$

where variables should be bounded as below

$$\begin{aligned} 0 &\leq x_1 \leq 100 \\ 0 &\leq x_2 \leq 100 \\ 10 &\leq x_3 \leq 200 \\ 10 &\leq x_4 \leq 200 \end{aligned} \tag{16}$$

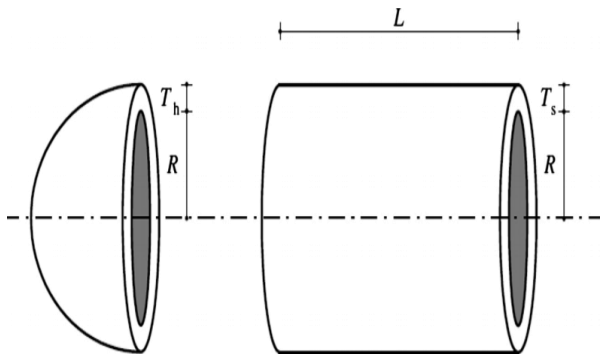


Figure 3. The system of pressure vessel

Table 11. Comparison of the optimal results for the pressure vessel problem

Values	FA	TLBO	DSO	IMO	BOA
$x_1(T_s)$	0.783564	0.778169	0.778167	1.072400	0.812499
$x_2(T_h)$	0.387770	0.384649	0.384649	0.503148	0.437500
$x_3(R)$	40.59555	40.319689	40.31963	52.75704	42.09126
$x_4(L)$	196.30941	199.999022	199.9998	78.56643	176.7465
$f(\mathbf{X})$					
Best	5898.33	5884.71	5884.719	6756.42	6061.077
Worst	6075.45	5889.41	5884.790	6820.33	6363.804
Mean	5998.02	5886.01	5884.728	6788.25	6347.133
Std. Dev.	250.38	3.68	4.91	101.23	326.4545
OFEs	52250	10360	9970	16320	2120

Welded beam problem

Next constrained problem taken into account to

measure the search performance of selected optimization methods is the design of the welded beam problem presented in Figure 4. The objective function of the current problem is the total cost minimization of the welded beam satisfying constraints restrict bending stress ( $\sigma$ ), deflection ( $\delta$ ) and shear stress ( $\tau$ ). Four aspects associated with the cross-section ( $b$ ,  $t$ ) and welds ( $l$ ,  $h$ ) are considered as the decision variables. So, this problem mathematically formulated in Eq.(16)-(19). As can be seen the search space of this problem is restricted with seven different constraints. The obtained results for all methods are comparatively tabulated in Table 12. Based on the given information the methods can be sorted as TLBO, FA, DSO, BOA and IMO with 1.724856, 1.73309, 1.737297, 1.90001 and 2.093012 objective values, respectively. It should be noted that, respecting to the statistical data TLBO with lowest value of standard deviation shows most stable behavior.

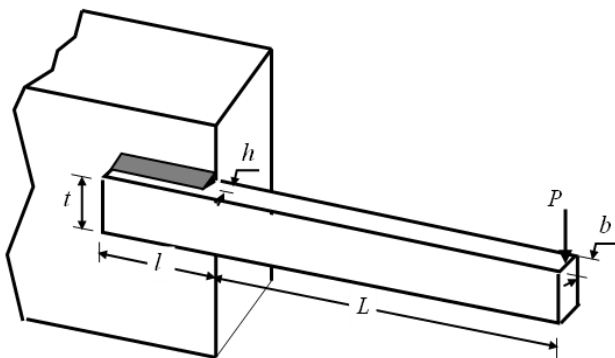


Figure 4. The welded beam

$$\text{cost}(\mathbf{X}) = 1.10471x_1^2x_2 + 0.04811x_3x_4(14 + x_2) \quad (17)$$

where,

$$\mathbf{X} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$$

subjected to

$$\begin{aligned} g_1(x) &= \tau(x) - \tau_{\max} \leq 0 \\ g_2(x) &= \sigma(x) - \sigma_{\max} \leq 0 \\ g_3(x) &= x_1 - x_4 \leq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$g_1(x) = 0.10471x_1^2 + 0.04811x_3x_4(14 + x_2) - 5 \leq 0$$

$$g_5(x) = 0.125 - x_1 \leq 0$$

$$g_6(x) = \delta(x) - \delta_{\max} \leq 0$$

$$g_7(x) = p - p_c(x) \leq 0$$

bounded with

$$0.1 \leq x_1 \leq 2$$

$$0.1 \leq x_2 \leq 10$$

$$0.1 \leq x_3 \leq 10$$

$$0.1 \leq x_4 \leq 2$$

where

$$\tau(x) = \sqrt{(\tau')^2 + 2\tau'\tau'' \frac{x_2}{2R} + (\tau'')^2}$$

$$\tau' = \frac{P}{\sqrt{2}x_1x_2}$$

$$\tau'' = \frac{MR}{J}$$

$$M = P \left( L + \frac{x_2}{2} \right)$$

$$R = \sqrt{\frac{x_2^2}{4} + \left( \frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2}$$

$$J = 2 \left\{ \sqrt{2}x_1x_2 \left[ \frac{x_2^2}{12} + \left( \frac{x_1 + x_3}{2} \right)^2 \right] \right\} \quad (19)$$

$$\sigma(x) = \frac{6PL}{x_4x_3^2}$$

$$\delta(x) = \frac{4PL^3}{Ex_3^3x_4}$$

$$P_c(x) = \frac{4.013\sqrt{E(x_3^2x_4^6/36)}}{L^2} \left( 1 - \frac{x_3}{2L} \sqrt{\frac{E}{4G}} \right)$$

where,

$$P = 6000 \text{ lb}, L = 14 \text{ in.}, E = 30 \times 10^6 \text{ psi},$$

$$\tau_{\max} = 13,600 \text{ psi}, \sigma_{\max} = 30,000 \text{ psi},$$

$$\delta_{\max} = 0.25 \text{ in.}$$

Table 12. Comparison of the optimal results for welded beam design problem

Values	FA	TLBO	DSO	IMO	BOA
$x_1(h)$	0.206976	0.205730	0.199742	0.206188	0.248729
$x_2(l)$	3.460759	3.470484	3.612060	4.952083	2.953780
$x_3(t)$	8.992902	9.036616	9.037500	8.647560	8.362973
$x_4(b)$	0.207736	0.20573	0.206082	0.235955	0.249008
$f(\mathbf{X})$					
Best	1.73309	1.724856	1.737297	2.093012	1.90001
Worst	1.99654	1.728774	1.994651	7.332687	3.89657
Mean	1.75741	1.730001	1.813290	4.978542	2.55489
Std. Dev.	0.15637	0.070401	0.092100	4.002589	1.99562
OFEs	100000	10680	11680	25860	8650

*Design of a spatial 582-bar tower*

The last case is devoted to a structural optimization example as the weight minimization of the spatial 582-bar tower shown in Figure 5. To maintain symmetry, the members of the structure are categorized into 32 independent groups. There are three load condition acting on the tower as follows:

- I. The vertical load as -6.75 kips on each node
- II. The horizontal load as 1.12 kips on each node in x- direction
- III. The horizontal load as 1.12 kips on each node in y- direction

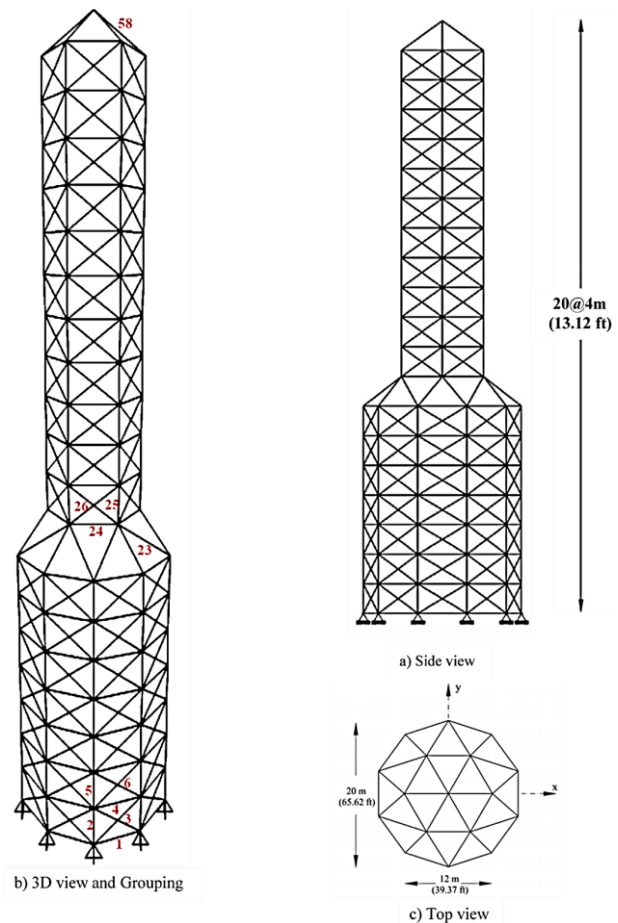


Figure 5. The 582-bar truss tower

The sizing variables for this example are selected from the discrete set addressed in Table 13. The members of this set consist of 140 W-shape profiles given in steel structural profiles of AISC-ASD.

Table 13. W-shape profiles list taken from AISC code

W27×178	W21×122	W18×50	W14×455	W14×74	W12×136	W10×77
W27×161	W21×111	W18×46	W14×426	W14×68	W12×120	W10×68
W27×146	W21×101	W18×40	W14×398	W14×61	W12×106	W10×60
W27×114	W21×93	W18×35	W14×370	W14×53	W12×96	W10×54
W27×102	W21×83	W16×100	W14×342	W14×48	W12×87	W10×49
W27×94	W21×73	W16×89	W14×311	W14×43	W12×79	W10×45
W27×84	W21×68	W16×77	W14×283	W14×38	W12×72	W10×39
W24×162	W21×62	W16×67	W14×257	W14×34	W12×65	W10×33
W24×146	W21×57	W16×57	W14×233	W14×30	W12×58	W10×30
W24×131	W21×50	W16×50	W14×211	W14×26	W12×53	W10×26
W24×117	W21×44	W16×45	W14×193	W14×22	W12×50	W10×22
W24×104	W18×119	W16×40	W14×176	W12×336	W12×45	W8×67
W24×94	W18×106	W16×36	W14×159	W12×305	W12×40	W8×58
W24×84	W18×97	W16×31	W14×145	W12×279	W12×35	W8×48
W24×76	W18×86	W16×26	W14×132	W12×252	W12×30	W8×40
W24×68	W18×76	W14×730	W14×120	W12×230	W12×26	W8×35
W24×62	W18×71	W14×665	W14×109	W12×210	W12×22	W8×31
W24×55	W18×65	W14×605	W14×99	W12×190	W10×112	W8×28
W21×147	W18×60	W14×550	W14×90	W12×170	W10×100	W8×24
W21×132	W18×55	W14×500	W14×82	W12×152	W10×88	W8×21

Their upper and lower bounds are respectively limited to 6.16 in<sup>2</sup> (39.74 cm<sup>2</sup>) and 215.00 in<sup>2</sup> (1387.09 cm<sup>2</sup>). The nodal displacement for all principal directions are limited up to 3.15 in (8 cm). The stress limitation is determined based on the buckling criterion of the AISD-ASD89 code as follows [1]:

$$\begin{cases} \sigma_i^+ = 0.6F_y & \sigma_i \geq 0 \\ \sigma_i^- & \sigma_i < 0 \end{cases} \quad (20)$$

where  $F_y$  is the yielding stress of the materials and  $\sigma_i^-$  and  $\sigma_i^+$  are compressive and tensile stresses, respectively. While,  $\sigma_i^-$  is also a function of the slenderness ratio given as follows:

$$\sigma_i^- = \begin{cases} \left[ \left( 1 - \frac{\lambda_i^2}{2C_c^2} \right) F_y / \left( \frac{5}{3} + \frac{3\lambda_i}{8C_c} - \frac{\lambda_i^3}{8C_c^3} \right) \right] & \text{for } \lambda_i < C_c \\ \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_i^2} & \text{for } \lambda_i \geq C_c \end{cases} \quad (21)$$

in which  $C_c$  is the slenderness ratio which is defined as:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (22)$$

According to the code, maximum slenderness

ratio (i.e. allowable ratio) should be limited as up to 200 and 300 for compressive and tensile structural members, respectively. The slenderness ratio is mathematically illustrated as follows:

$$\lambda_i = \frac{k_i l_i}{r_i} \leq \begin{cases} 300 & \text{for tension members} \\ 200 & \text{for compression members} \end{cases} \quad (23)$$

where  $\lambda_i$ ,  $r_i$ , and  $l_i$  are the slenderness ratio, radius of gyration and length of the  $i^{\text{th}}$  member, respectively. For compression elements, if the required slenderness ratio is not be satisfied, the allowable stress must not surpass the value of  $\left( \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_i^2} \right)$  ever [1]. This example as the complex structural optimization are solved via five selected techniques and the archived results are tabulated in Table 14. The number of structural analyses (NSA) and standard deviation (STD) for each algorithm are provided.

Table 14. Comparison of the optimal results for the 582-bar tower problem

Groups	Optimal cross-sectional areas				
	FA	TLBO	DSO	IMO	BO
1	W8×21	W8×21	W8×24	W8×21	W8×24
2	W24×76	W24×84	W12×72	W12×79	W24×68
3	W8×21	W8×21	W8×28	W8×24	W8×28
4	W12×65	W24×62	W12×58	W10×60	W18×60
5	W8×21	W8×21	W8×24	W8×24	W8×24
6	W8×21	W8×21	W8×24	W8×21	W8×24
7	W10×54	W16×57	W10×49	W8×48	W21×48
8	W8×21	W8×21	W8×24	W8×24	W8×24
9	W8×21	W8×21	W8×24	W8×21	W10×26
10	W12×50	W12×53	W12×40	W10×45	W14×38
11	W8×21	W8×21	W12×30	W8×24	W12×30
12	W10×68	W10×77	W12×72	W10×68	W12×72
13	W24×76	W21×83	W18×76	W14×74	W21×73
14	W14×53	W21×57	W10×49	W8×48	W14×53
15	W12×79	W18×76	W14×82	W18×76	W18×86
16	W8×21	W8×21	W8×31	W8×31	W8×31
17	W12×65	W10×22	W14×61	W8×21	W18×60
18	W8×21	W18×55	W8×24	W16×67	W8×24
19	W8×21	W8×21	W8×21	W8×24	W16×36
20	W12×45	W8×21	W12×40	W8×21	W10×39
21	W8×21	W14×30	W8×24	W8×40	W8×24
22	W8×21	W8×21	W14×22	W8×24	W8×24
23	W16×26	W8×21	W8×31	W8×21	W8×31
24	W8×21	W8×21	W8×28	W10×22	W8×28
25	W8×21	W8×21	W8×21	W8×24	W8×21
26	W8×21	W8×21	W8×21	W8×21	W8×24
27	W8×21	W10×22	W8×24	W8×24	W8×28
28	W8×21	W8×21	W8×28	W8×24	W14×22
29	W8×21	W8×21	W16×36	W8×24	W8×24
30	W8×21	W8×31	W8×24	W8×24	W8×24
31	W8×21	W8×21	W8×21	W8×24	W14×22
32	W8×21	W12×22	W8×24	W8×24	W8×24
Volume (m <sup>3</sup> )	20.07	20.3	22.07	23.4	22.37
NSA	25890	16050	17670	5850	8880
Std. (m <sup>3</sup> )	0.53	0.22	0.51	1.82	0.32

## Conclusion

The current investigation deals with comparatively measurement of the five metaheuristic algorithms from various aspects. These algorithms have been selected to cover the latest methods announced in the last decade (between 2009 to 2019). The selected algorithms chronologically (i.e. based on their emerging date) can be sorted as Firefly Algorithm (FA), Teaching and Learning Based Optimization (TLBO), Drosophila Food-Search Optimization (DSO), Ions Motion Optimization (IMO) and Butterfly Optimization Algorithm (BOA). To gain a comprehensive assessment, the performance of these algorithms are verified on different classes of optimization problems contain mathematical, mechanical and structural cases. Beside of the variety, technically these cases consist both constraint and non-constrained search spaces, discrete and continuous design variables. So, they comprehensively challenge the algorithms on handling the different types of domains and boundaries. The methods are evaluated and compared considering different features like convergence rate, stability, diversity, complexity and accuracy level.

The achieved outcomes are provided through the illustrative tables and diagrams. Obtained numeric result show that BOA could outperform all other algorithms on handling the non-constrained optimization problems. But interestingly it cannot show the same performance on handling the constrained optimization problems, and in this category TLBO demonstrates the superior performance. Complexity tests reveal that DSO stands as the most complex method while IMO is the least complex algorithm among the all other selected techniques. Also, it should be noted that for the constrained problems, TLBO with the least standard deviation value shows the most stability level on finding the optimal solution. Overall insight into the results declares that not necessarily the latest method(s) should be picked up as the best method(s), but the algorithms, as the black-box optimizer tools, may show distinctive performances on different classes of

problems. Consequently, since this investigation cover different classes of optimization problems, it provides contributory platform for scholars on taking the most proper algorithm(s) for desired problems.

## References

1. AISC American Institute of Steel Construction (AISC). Manual of steel construction allowable stress design. 9th ed. Chicago, IL. **1989**, 1-360,
2. Arora, S.,Singh, S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization. *Soft Computing* **2019**, 23(3), 715-734, <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-018-3102-4>
3. Camp, C.V.,Farshchin, M. Design of space trusses using modified teaching-learning based optimization. *Engineering Structures* **2014**, 62–63(87-97), <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.020>
4. Das, K.N.,Singh, T.K. Drosophila Food-Search Optimization. *Applied Mathematics and Computation* **2014**, 231(566-580), <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.01.040>
5. Degertekin, S.O.,Hayalioglu, M.S. Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures* **2013**, 119(177-188), <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2012.12.011>
6. Eker, M.K.,Karadeniz, A. Rüzgar Ve Termik Santrallerden Oluşan Enerji Sistemlerinde Ekonomik Güç Dağılımının Big-Bang Big-Crunch, PSO ve IMO Algoritmaları İle İrdelenmesi. *Politeknik Dergisi* **2016**, 19(3),
7. Hasançebi, O.,Çarbaş, S.,Doğan, E.,Erdal, F.,Saka, M.P. Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames. *Computers & Structures* **2010**, 88(17–18), 1033-1048, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.06.006>
8. Javidy, B.,Hatamlou, A.,Mirjalili, S. Ions motion algorithm for solving optimization problems. *Applied Soft Computing* **2015**, 32(72-79), <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.03.035>
9. Kaveh, A.,Zolghadr, A. Democratic PSO for truss layout and size optimization with frequency constraints. *Computers & Structures* **2014**, 130(10-21), <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.09.002>
10. Kennedy, J.,Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization, Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on. pp. 1942-1948 vol.1944.
11. Lieu, Q.X.,Do, D.T.T.,Lee, J. An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency



- constraints. *Computers & Structures* **2018**, 195(99-112, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.06.016>
12. Lim, W.H.,Mat Isa, N.A. Two-layer particle swarm optimization with intelligent division of labor. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **2013**, 26(10), 2327-2348, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2013.06.014>
  13. Lim, W.H.,Mat Isa, N.A. Teaching and peer-learning particle swarm optimization. *Applied Soft Computing* **2014**, 18(39-58, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.009>
  14. Miguel, L.F.F.,Lopez, R.H.,Miguel, L.F.F. Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the Firefly algorithm. *Advances in Engineering Software* **2013**, 56(23-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.11.006>
  15. Moloodpoor, M.,Mortazavi, A.,Ozbalta, N. Thermal analysis of parabolic trough collectors via a swarm intelligence optimizer. *Solar Energy* **2019**, 181(264-275, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.008>
  16. Mortazavi, A. Interactive fuzzy search algorithm: A new self-adaptive hybrid optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* **2019**, 81(270-282, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.03.005>
  17. Mortazavi, A.,Toğan, V. Triangular units based method for simultaneous optimizations of planar trusses. *Advances in Computational Design* **2017**, 2(3), 195-210, <https://doi.org/10.12989/acd.2017.2.3.195>
  18. Mortazavi, A.,Togan, V.,Daloğlu, A.,Nuhoglu, A., 2016. Simultaneous topology and sizing optimization of trusses with two different optimization algorithms, 12<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering. Istanbul, Turkey.
  19. Mortazavi, A.,Toğan, V.,Moloodpoor, M. Solution of structural and mathematical optimization problems using a new hybrid swarm intelligence optimization algorithm. *Advances in Engineering Software* **2019**, 127(106-123, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.11.004>
  20. Mortazavi, A.,Toğan, V.,Nuhoglu, A. An integrated particle swarm optimizer for optimization of truss structures with discrete variables. *Structural Engineering and Mechanics* **2017**, 61(359-370, <https://doi.org/10.12989/sem.2017.61.3.359>
  21. Mortazavi, A.,Toğan, V.,Nuhoglu, A. Weight minimization of truss structures with sizing and layout variables using integrated particle swarm optimizer AU - Mortazavi, Ali. *Journal of Civil Engineering and Management* **2017**, 23(8), 985-1001, <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2017.1348982>
  22. Rao, R.V.,Savsani, V.J.,Vakharia, D.P. Teaching-learning-based optimization: A novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-Aided Design* **2011**, 43(3), 303-315, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2010.12.015>
  23. Rao, R.V.,Waghmare, G.G. Complex constrained design optimisation using an elitist teaching-learning-based optimisation algorithm. *International Journal of Metaheuristics* **2014**, 3(1), 81-102, <http://dx.doi.org/10.1504/ijmheur.2014.058863>
  24. Ray, T.,Liew, K.M. Society and civilization: An optimization algorithm based on the simulation of social behavior. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* **2003**, 7(4), 386-396, <http://dx.doi.org/10.1109/TEVC.2003.814902>
  25. Storn, R.,Price, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. *Journal of Global Optimization* **1997**, 11(4), 341-359, <http://dx.doi.org/10.1023/a:1008202821328>
  26. Suganthan, P.N.,Hansen, N.,Liang, J.J.,Deb, K.,Chen, Y.,Auger, A.,Tiwari, S. Problem definitions and evaluation criteria for the CEC 2005 special session on real-parameter optimization. Technical Report, Nanyang Technological University, Singapore, May 2005 AND KanGAL Report 2005005, IIT Kanpur, India 2005,
  27. Toğan, V. Design of planar steel frames using Teaching-Learning Based Optimization. *Engineering Structures* **2012**, 34(225-232, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.035>
  28. Toğan, V.,Mortazavi, A. Sizing optimization of skeletal structures using teaching-learning based optimization. *Optimization and Control: Theories Applications* **2017**, 7(2), 12, <http://dx.doi.org/10.11121/ijocta.01.2017.00309>
  29. Yang, X.-S., 2009. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, in: Watanabe, O., Zeugmann, T. (Eds.), *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 169-178.
  30. Yuhui, S.,Eberhart, R.C., 2001. Fuzzy adaptive particle swarm optimization, Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546). pp. 101-106 vol. 101.



# DC Motor Sürücüsü İçin Model Öngörülü Denetleyici Tasarımı

**Ammar BAWDAKA\***

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[15805005@dicle.edu.tr](mailto:15805005@dicle.edu.tr) ORCID: 0000-0001-7297-7441, Tel: 0 505 155 02 14

**İbrahim KAYA**

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[ikaya@dicle.edu.tr](mailto:ikaya@dicle.edu.tr) ORCID: 0000-0002-8393-1358, Tel: (412) 241 10 00 (3507)

Geliş: 12.07.2019, Revizyon: 20.08.2019, Kabul Tarihi: 20.09.2019

## Öz

*Model Öngörülü Kontrol çok değişkenli kısıtlı sistemlerin denetiminde kullanılan çok güçlü bir kontrol stratejisidir. Ayrıca, bu denetim metodu klasik kontrolden çok farklı olup yüksek tasarım becerileri gerektirir. Bu makale, Model Öngörülü Kontrol stratejilerinden birinin bir DC motorun matematiksel modeline dayalı uygulanmasının sonuçlarını sunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, bu stratejinin gelişmiş endüstriyel sistemlerde nasıl çalıştığını ve bu denetleyicilerin üstlenebileceği aktif rolü göstermektir. Bu amaçla, Model Öngörülü Kontrol ile klasik PI-P denetleyici arasında benzetim yoluyla karşılaştırmalar yapılarak Model Öngörülü Kontrolün yüksek kapalı çevrim performansı gösterilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Model Öngörülü Kontrol (MPC), DC Motor, PI-P Denetleyici, Matlab, Simulink, MPC Araç Kutusu.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar:

## Giriş

Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control, MPC), diğer gelişmiş kontrol tekniklerinde olduğu gibi, bir insanın düşünme yöntemine çok yakın davranan denetleyiciler üretirek sistemdeki hataları hızlı ve etkin bir şekilde yok eder. Başka bir deyişle, MPC denetleyiciler sistemdeki hataları daha oluşmadan önce öngörmeye çalıştıklarından bu ismi almışlardır.

MPC denetleyici, FPGA ve ARM veya çok hızlı işlem yapabilen mikroişlemcilerde gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılabilir (Gopi vd., 2013). Ancak, yakın zamanda yapılan bir çalışmada, Arduino gibi daha yavaş olan çiplerde de MPC denetleyicilerin çevrimdışı çalışabileceği bildirilmiştir (Prasetyo vd., 2018). MPC denetleyiciler, endüstriyel uygulamalarda yaygın araştırılan çalışma alanlarından olmuştur (Qin ve Badgwell, 2003). Bunun nedeni, geleneksel PID denetleyicilerin aksine, MPC algoritması ile tasarlanmış denetleyicilerin kontrol algoritmasının içine sistem kısıtlarını da katılabilmesi, -hızlı cevap verebilmeleri ve performanslarındaki dayanımdır. Bu çalışmada, MPC denetleyici ile serbest uyarımlı DC motorun matematiksel modeli kullanılarak söz konusu motorun hız kontrolüne dair sonuçlar verilmiştir.

Literatürde, farklı MPC denetleyiciler hakkında yapılmış çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin, Gonzarolli vd. (2010) doğrusal-olmayan Model Öngörülü Kontrol ile bir DC motorun hız denetimini çalışmıştır. Bangia vd. (2015) doğrusal hale getirilmiş bir DC motorun çalışma zamanı ile alakalı problemleri iyileştirmeye yönelik analiz ve tasarımı MPC stratejisi ile çalışmıştır. Alkurawy ve Khamas (2018) MPC denetleyici yöntemlerinden olan Dinamik Matris Kontrol (DMC) ile klasik PI denetleyici kullanılarak denetlenen bir DC motorun performans karşılaştırmasını vermiştir.

Syaichu-Rohman ve Sirius (2011) bir DC

motorun hız kontrolünü MPC denetleyicinin Programlanabilir Mantık Denetleyici (PLC) ile uygulamasını vermiştir. Klasik PID denetleyici, Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) ve MPC ile yapılan bir DC motorun hız kontrolüne ait karşılaştırmalar Dani vd. (2017) tarafından sağlanmıştır. Durmaz vd. (2018) aktif bir süspansiyon sisteminin LQR ve MPC ile kontrol edilmesi ve performanslarının karşılaştırılmasını çalışmışlardır. Çalışmada, MPC denetleyici için Matlab MPC araç kutusu kullanmışlardır. Šlapák vd. (2016) DC-DC çevirici ile beslenen fırçalı sürekli mıknatıslı DC motorun sonlu kontrol set MPC ile denetlenmesine ait tasarım prosedürünü açıklamışlardır. Çalışmada önerilen MPC denetleyicinin performansı PI-PWM kaskad hız kontrol ile karşılaştırılmış ve 250 W'lık bir laboratuvar prototipinde test edilmiştir.

MPC tasarımı karmaşık olduğu için, bu denetleyicilerin tasarımı için genellikle bu amaç için hazırlanmış olan araç kutuları kullanılmaktadır. Currie ve Wilson (2009) MPC uygulamalarının test edilebilmesi için bir grafik kullanıcı arayüzü geliştirmişlerdir. Çalışmada, ayrıca, gömülü sistemler için oto-kod üreten ve farklı derlemelere imkan veren MPC'nin Simulink'te gerçekleştirilmesi de verilmiştir. Qin ve Badgwell (2003) dinamik bir modelden başlayarak, tamamen otomatik bir şekilde, Matlab ile bir gömülü donanım üzerinde MPC'nin gerçekleştirilmesini çalışmışlardır. Kayan noktalı aritmetik birimi olmayan genel amaçlı mikrodenetleyicilerde kullanılabilen MPC'nin geliştirilmesi Boshkovski vd. (2017) tarafından verilmiştir.

Bu çalışmada öncelikle, tasarlanacak MPC denetleyicinin performansını test etmek için, bir DC motor modeli DC motoru ifade eden matematiksel denklemlerin kullanılması ile elde edilmiştir. Daha sonra DC motorun hız ve akımını kontrol etmek için bir PI-P denetleyici tasarlanmıştır. Son olarak, DC motorun performansının iyileştirilmesi için, farklı ayar ağırlıkları ve sistem kısıtları göz önüne alınarak Matlab/Simulink ortamında bir MPC denetleyici

tasarlanmıştır. Tasarlanan MPC denetleyicinin sergilediği performans PI-P denetleyiciler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, farklı çalışma koşulları altında tasarlanan MPC'nin performansı test edilmiştir.

## Model Öngörülü Kontrol:

Model Öngörülü Kontrol, kimya mühendisliği ve gıda işlemede yaygın olarak kullanılan gelişmiş bir kontrol stratejisidir. MPC çok değişkenli bir kontrol stratejisi olup, sadece süreç çıkışını referans giriş değerinde tutmaya çalışmakla kalmaz, aynı zamanda süreci önceden belirlenmiş sistem limitleri içinde tutmaya çalışır. Her bir örnekleme zamanında kısıtlı bir optimizasyon problemi çözülerek, gelecekteki kontrol dizisi elde edilir. Gelecekteki kontrol dizisi, gelecekteki kontrol yönü üzerinde, tahmin edilen çıkış ve ayar noktası ve kontrol hareketleri arasındaki karesel sapmaların ağırlıklı toplamının en aza indirileceği şekilde ilerler (Camacho & Bordons, 2007).

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} \|y(k+i|k) - r(k+i|k)\|_0^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_r^2 \quad (1)$$

Denklem (1), MPC denetleyiciye ait standart quadratik maliyet fonksiyon denklemdir. Burada,  $N_p$  ve  $N_c$ , sırasıyla, öngörü ufkunu ve kontrol ufkunu ifade etmektedir. Ayrıca;  $y$ ,  $r$  ve  $u$  sırasıyla, öngörülen çıkışı, referans girişi ve gelecekteki kontrol hareketleri dizisini ifade etmektedir. Maliyet fonksiyonu doğrusal süreç dinamikleri, giriş ve çıkışlar ve giriş değişim kısıtları ile sınırlandırılır. Süreç açık çevrim kararlı olmak zorunda değildir. Bazı matematiksel işlemler sonucunda, yukarıda verilen maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi düzenlenebilir (Maciejowski, 2002; Rossiter, 2016):

$$\min_{\Delta u} J = \frac{1}{2} \Delta u^T H \Delta u + F^T \Delta u \quad (2)$$

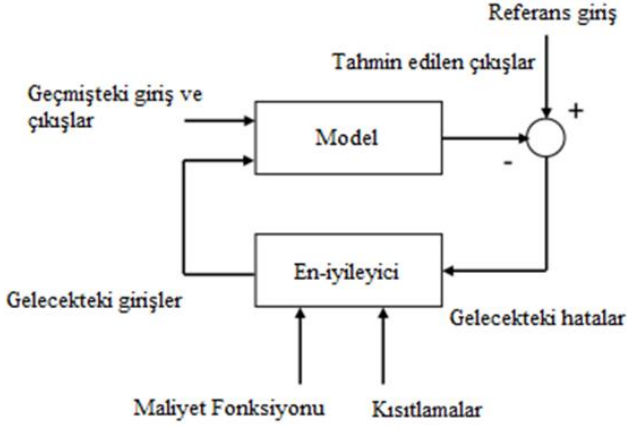
subject :  $A \Delta u \leq b$

Denklem (2)'nin türetilmesi için ilgili referanslara bakılabilir. MPC denetleyici, tek-girişli tek-çıkışlı, çok-girişli çok-çıkışlı ve kare olmayan (farklı giriş ve çıkış sayılarına sahip) sistemleri kontrol etmede kullanılabilir. Ayrıca, MPC denetleyicinin bir diğer önemli avantajı sisteme uygulanacak en-iyi kontrol sinyalinin hesaplanmasında sistem kısıtlarının göz önüne alınmasına olanak vermesidir. Dolayısıyla, MPC denetleyiciler 1970'lerden günümüze kadar süreç denetiminde tercih edilen kontrol yöntemi olmuştur.

Model Öngörülü Kontrol (MPC) ifadesi, belirli bir kontrol stratejisini değil, bir sürece ait bir modeli kullanıp maliyet fonksiyonunu minimize ederek kontrol sinyalini elde eden çok çeşitli kontrol yöntemlerini ifade eder. Doğrusal olan ve Doğrusal-olmayan MPC, Genelleştirilmiş Öngörülü Kontrol (Generalized Predictive Control, GPC), Öngörülü Fonksiyonel Kontrol (Predicted Functional Control, PFC) ve Dinamik Matris Kontrol (Dynamic Matrix Control, DMC) gibi farklı MPC algoritmaları mevcuttur. Ancak, hepsinde olan genel bir özellik mevcuttur: - Sürecin gelecekteki çıkışını tahmin edebilmek için süreç modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Süreç modeli kullanılarak, sürecin gelecekteki çıkışı tahmin edilir. Böylece, denetleyicinin sistem dinamikleri, ölü-zaman ve kısıtların ihlali gibi durumları önceden tahmin etmesi sağlanır ve bir sonraki kontrol hareketi hesaplanır.

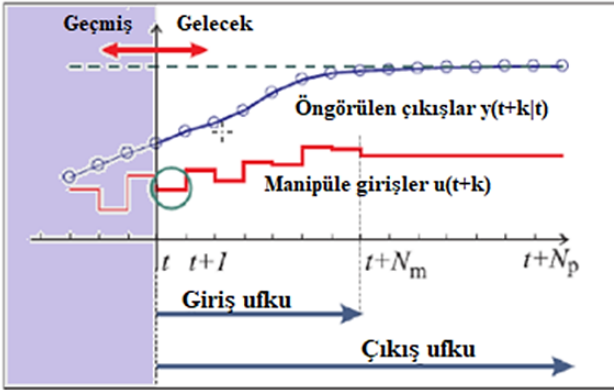
## Temel MPC Yapısı

MPC'nin temel yapısı Şekil 1'de gösterilmiştir. Geçmişteki değerler, hali hazırdaki değerler ve tasarımcı tarafından önerilen en-iyi gelecek kontrol eylemlerine dayalı olarak, gelecekteki süreç çıkışları süreç modeli kullanılarak tahmin edilir. Kontrol eylemleri, en-iyileyici tarafından maliyet fonksiyonu ve kısıtlar da göz önüne alınarak hesaplanır. Süreç modeli denetimde belirleyici bir rol oynamaktadır. Seçilen süreç modeli, gelecekteki çıkışları doğru bir şekilde tahmin edebilmek için, hem tüm süreç dinamiklerini kapsamalıdır hem de gerçekleştirilebilir ve anlaşılabilir olması için basit olmalıdır (Camacho ve Bordons, 2007).



Şekil 1. MPC'nin Temel Yapısı (Camacho ve Bordons, 2007)

MPC basık ufuk ilkesini kullanır. Basık ufuk ilkesinde, sistemin her bir  $t$  örnekleme zamanında, ilk en-iyilenmiş kontrol sinyali sisteme uygulanır. Sonra,  $t+1$  zamanında, yeni kontrol sinyalini elde etmek için optimal kontrol problemi çözülür. Bu ilke tüm MPC algoritmaları için ortak olup Şekil 2'de gösterilmiştir. Geribesleme bilgileri her örnekleme zamanında süreçten toplanırken, basık ufuk sürecin istenilen özelliklerde davranmasını sağlar.



Şekil 2. Basık ufuk stratejisi (Bemporad, 2016)

Özellikle çok-girişli ve çok-çıkışlı sistemlerde, her bir döngüde yer alan PID denetleyicilerin ayrı ayrı tasarlanması ve döngü etkileşimlerinin azaltılması veya yok edilmesi için farklı kontrol tekniklerine ihtiyaç duyulur. Bu dezavantajlar MPC ile kolayca aşılabildiğinden, MPC denetleyiciler ile PID denetleyicilere göre daha üstün bir performans elde edilir.

## DC Motorun Modellenmesi

Basitliği ve değişken hız kontrolünün uygulanması kolay olduğundan, DC motorlar endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Her fiziksel sistem, giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi veren transfer fonksiyonu formunda ifade edilebildiğinden, DC motorlar da dört denklem kullanılarak transfer fonksiyonu yapısında modellenebilir. Ayrıca, durum değişkenleri, durum değişkenlerinin türevleri, girişler ve çıkışlar arasındaki ilişkiyi veren durum uzayı denklemleri kullanılarak da modellenebilirler. DC motorun elektriksel kısmına ait denklem (Krishnani, 2010):

$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (3)$$

ile verilir. Denklem (3) düzenlenirse

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = v_a - e$$

elde edilir. Elde edilen son bağıntının Laplace dönüşümü alınırsa

$$(R_a + L_a(s))i_a = v_a - e$$

olur. Dolayısıyla, DC motorun elektrik kısmına ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{i_a}{v_a - e} = \frac{1}{L_a s + R_a} \quad (4)$$

Mekanik kısma ait transfer fonksiyonu türetmek için Newton denklemlerinden faydalanılır:

$$J\omega + f\omega = t_{em} - t_L$$

Burada  $t_L = t_d + f\omega_m$  yukarıdaki denklemde yerine yazılıp Laplace dönüşümü alınırsa aşağıdaki bağıntı bulunur.

$$\frac{\omega}{t_{em} - t_d} = \frac{1}{Js + f} \quad (5)$$

Denklem (4) ve (5) kullanılarak, çıkış açısal hız değeri ile giriş gerilimi arasındaki transfer fonksiyonu bulunabilir:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K / JL_a}{s^2 + [(JR_a + fL_a) / JL_a]s + (fR_a + K^2) / JL_a} \quad (6)$$

Benzer şekilde, açısal hız değeri ile yük torku arasındaki transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$H(s) = \frac{\omega(s)}{t_d(s)} = \frac{(R_a + L_a)}{(R_a + L_a s)(f + Js) + K^2} \quad (7)$$

Sonuçta, DC motor açısal hız değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\omega(s) = G(s)v_a - H(s)t_d \quad (8)$$

Bu çalışmada kullanılan DC motora ait fiziksel parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir (Nassani, 2012).

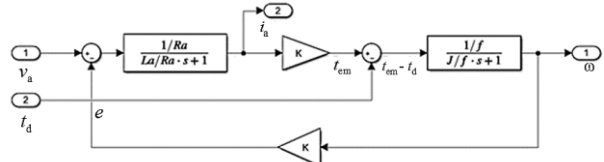
**Tablo 1.** DC Motor fiziksel parametreleri

Parametre	Nominal değeri
$R_a$ : Rotor direnci	11.8 ohm
$K$ : Elektriksel sabit	0.949 Nm/A
$L_a$ : Rotor endüktansı	0.2 H
$J$ : Eylemsizlik momenti	0.0086 kg/m <sup>2</sup>
$f$ : Viskoz sürtünme katsayısı	0.000574 Nm/rad.s
$\omega$ : Nominal açısal hız	209.4 rad/s
$t_d$ : Yük momenti (Bu çalışmada bozucu olarak varsayılmıştır).	1.58 Nm
$v_a$ : Armatür gerilimi (Sistemin kontrol girişi)	220 Volt

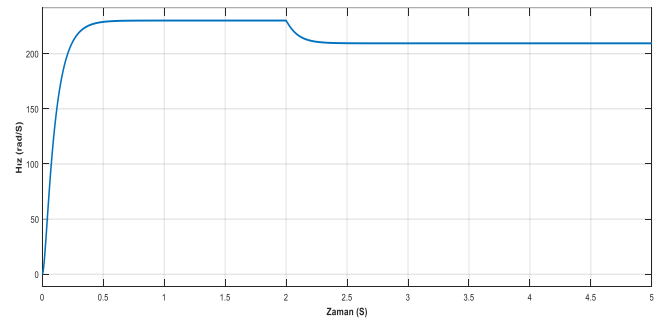
Denklem (4) ve (5) ile verilen transfer fonksiyonları ile modellenen bir DC motorun Matlab/Simulink ortamında gösterimi Şekil 3'te gösterilmiştir.

Şekil 3'te, DC motoru besleyen gerilimin doğrudan DC motora uygulanabildiği

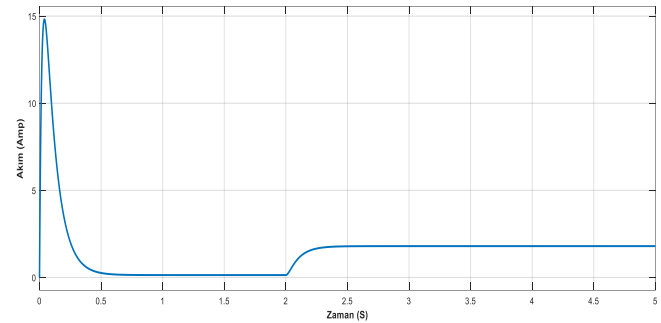
varsayılmıştır ve  $V_a = 220$  V ile verildiği kabul edilmiştir. Buna göre, motor açısal hız ve akım grafikleri, sırasıyla, Şekil 4 ve Şekil 5'te gösterilmiştir. DC motora uygulanacak gerilimi sağlayan DC-DC çevirici ideal çalıştığı varsayılarak modele dahil edilmemiştir.



**Şekil 3.** DC motorun Simulink gösterimi



**Şekil 4.** Nominal yük uygulanmadan ve uygulandıktan sonra motor açısal hız değişimi



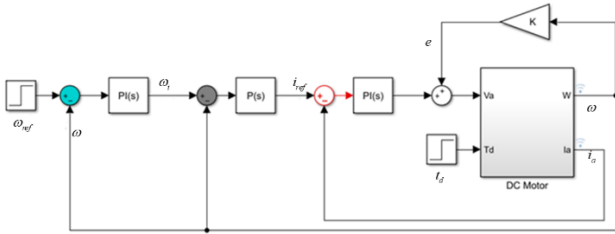
**Şekil 5.** Nominal yük uygulanmadan ve uygulandıktan sonra motor akımı değişimi

Motor 2 saniye boşa çalıştırıldıktan sonra 2. saniyede bir yük ile yüklenmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi, nominal yük uygulanmasında sistemin cevabında kalıcı durum hatası meydana gelmektedir. Ayrıca, Şekil 5'te motorun başlangıç akım değerinin çok büyük olduğu gözlenmektedir. Bu dezavantajlardan kurtulmak için uygun bir denetleyicinin tasarlanması gerekir. Klasik PI denetleyicinin kullanılması halinde, açısal hız değerinde meydana gelen

kalıcı durum hatasının yok edilmesi uzun zaman alacaktır. Dolayısıyla, bu çalışmada açılmal hız kalıcı durum hatasını hızlı bir şekilde yok etmek için, açılmal hız döngüsünde PI-P denetleyicinin kullanılması önerilmiştir. Önerilen PI-P denetleyicinin tasarımı bir sonraki bölümde anlatılmıştır.

## PI-P denetleyicilerin tasarımı

Bu bölümde öncelikle PI-P denetleyici ile DC motor açılmal hız denetimine yönelik tasarım verilecektir. PI-P denetleyici ile DC motor açılmal hız denetiminde kullanılan Simulink diyagramı Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. PI-P denetleyici ile DC motor açılmal hız denetimi (Zıt emk iç bozucu olarak kabul edilmiştir.)

Şekil 6’da, DC motor akımını kontrol etmek için kullanılan ideal PI denetleyicinin transfer fonksiyonunun

$$G_{PI,i} = K_{P-i} + \frac{K_{I-i}}{s} \quad (9)$$

ile verildiği kabul edilmiştir. Ayrıca, açılmal hız denetimi için dış döngüde transfer fonksiyonları

$$G_{P,\omega} = K_v \quad (10)$$

$$G_{PI,\omega} = K_{P-\omega} + \frac{K_{I-\omega}}{s} \quad (11)$$

ile verilen P ve PI denetleyicilerin kullanılması önerilmektedir. Şekilde görülen DC motor bloğunda, Şekil 3’te verilen DC motor eşdeğer blok diyagramı alt-sistem olarak yer almaktadır. Bu durumda, ölçülen açılmal hız ile referans açılmal hız değeri arasındaki transfer fonksiyonunun

$$\frac{i_a}{i_{a-ref}} = \frac{\frac{1}{R_a} K_{P-i} (s + \frac{K_{I-i}}{K_{P-i}})}{s(\frac{L_a}{R_a} s + 1) + \frac{1}{R_a} K_{P-i} (s + \frac{K_{I-i}}{K_{P-i}})} \quad (12)$$

ile verildiği kolaylıkla gösterilebilir. Bu çalışmada, PID tip denetleyicilerin ayar parametreleri kontrolör sentezi (Burns, 2001) yaklaşımı ile hesaplanacaktır.

(12) nolu denklemde, transfer fonksiyonuna ait sıfırın yok edilebilmesi için  $K_{I-i} / K_{P-i} = R_a / L_a$  kabul edilirse (12) nolu denklem aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir:

$$\frac{i_a}{i_{a-ref}} = \frac{\frac{1}{R_a} K_{P-i} (s + \frac{K_{I-i}}{K_{P-i}})}{s(\frac{L_a}{R_a} s + 1) + \frac{1}{R_a} K_{P-i} (s + \frac{K_{I-i}}{K_{P-i}})}$$

$$\frac{i_a}{i_{a-ref}} = \frac{K_{P-i}}{L_a} \frac{1}{s + \frac{K_{P-i}}{L_a}} \quad (13)$$

Dolayısıyla, kapalı çevrim sistemin birinci derece bir transfer fonksiyonuna dönüştürüldüğü (13) nolu denklemde görülmektedir. Buna göre, iç döngüdeki PI denetleyicinin ayar parametrelerinin hesaplanması için, ayar parametrelerinden  $K_{P-i}$  biliniyor kabul edilip diğer ayar parametresi aşağıdaki denklemde hesaplanabilir:

$$K_{I-i} = \frac{R_a}{L_a} K_{P-i} \quad (14)$$

Dış döngüde yer alan P denetleyicinin oransal kazanç değerinin hesaplanması yine kontrolör sentezi ile yapılacaktır. Şekil 6’da  $\omega$  ile  $\omega_i$  arasındaki kapalı çevrim transfer fonksiyonunun

$$\frac{\omega}{\omega_i} = \frac{(KK_v K_{P-i} / JL_a)}{s^2 + (K_{P-i} / L_a + f / J)s + (fK_{P-i} + KK_v K_{P-i} / JL_a)} \quad (15)$$

ile verildiği hesaplanabilir. Bu transfer fonksiyonu standart ikinci derece bir transfer fonksiyonuna benzetilmek istenirse, aşağıdaki bağıntılara ulaşılabilir.

$$\omega_{n1} = \frac{1}{2\zeta} \left( \frac{K_{P-i}}{L_a} + \frac{f}{J} \right) = \frac{JK_{P-i} + fL_a}{2JL_a} \quad (16)$$

$$K_v = \frac{\omega_{n1}^2 JL_a - fK_{P-i}}{K_{P-i}K} \quad (17)$$

(16) ve (17) nolu denklemlerden,  $K_v$  değeri  $\omega_{n1}$  değerine bağlıdır.  $\omega_{n1}$  ise  $\xi$  değerine bağlıdır. Sonuçta,  $K_v$  değerinin elde edilebilmesi için  $\xi$  değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, basamak cevapta aşımaların olmaması için  $\xi = 1$  kabul edilmiştir.

Dış döngüde yer alan PI denetleyici ayar parametreleri  $K_{P-\omega}$  ve  $K_{I-\omega}$  değerlerinin hesaplanması için:

$$\frac{\omega}{\omega_{ref}} = \frac{(KK_v K_{P-i} K_{P-\omega} / JL_a)}{s^2 + \omega_{n1}s + (KK_v K_{P-i} K_{P-\omega} / JL_a)} \quad (18)$$

ile verildiği gösterilebilir.  $K_{I-\omega} / K_{P-\omega} = \omega_{n1}$  kabul edilip, (18) nolu denklemde yerine yazılırsa ve standart ikinci derece bir sisteme benzetilirse:

$$\omega_{n2} = \frac{\omega_{n1}}{2\zeta_2} \quad (19)$$

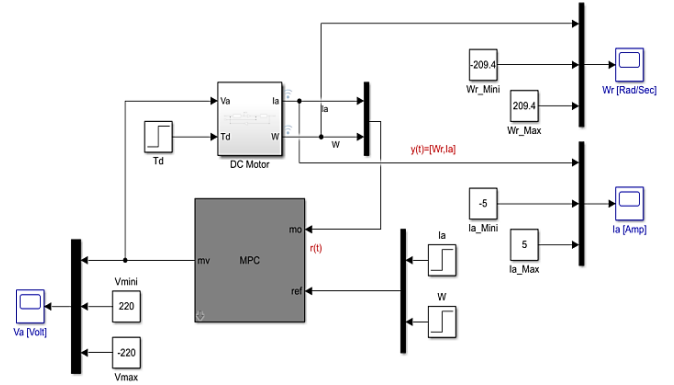
$$K_{P-\omega} = \frac{\omega_{n2}^2 JL_a}{KK_v K_{P-i}} \quad (20)$$

bağıntılarına ulaşılabilir. Bu çalışmada, (21) nolu denklemde  $\zeta_2 = 1/\sqrt{2}$  alınmıştır.

### MPC denetleyici tasarımı:

Bu bölümde, MPC denetleyici ile DC motorun açısal hız ve akım kontrolü verilecektir. Bu duruma ait Simulink diyagramı Şekil 7’de verilmiştir. Şekilde görülen DC motor bloğunda, Şekil 3’te verilen DC motor eşdeğer blok

diyagramı alt-sistem olarak yer almaktadır. Şekilde, giriş ve çıkış değişkenlerine ait kısıtlar da gösterilmiştir.



Şekil 7. MPC denetleyici ile DC motor denetimi için Simulink diyagramı

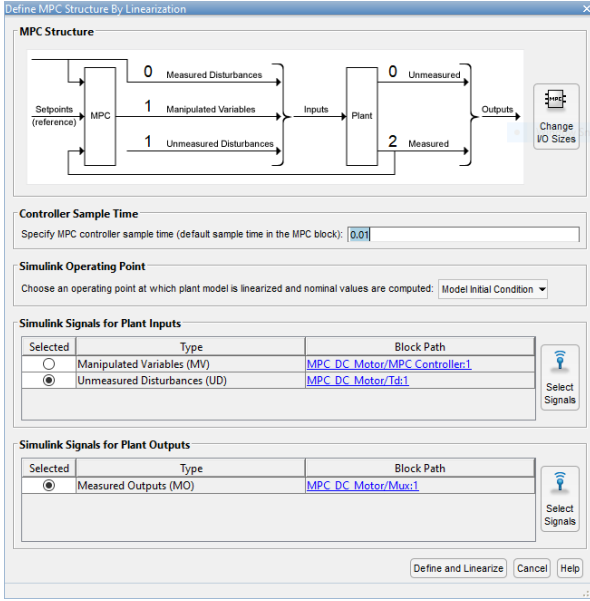
Bu çalışmada, MATLAB MPC Araç Kutusu kullanılarak MPC denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. MATLAB MPC Araç Kutusu ile tasarım üç adımda gerçekleştirilir: Birinci adımda sürece ait bir modelin tanımlanması gerekmektedir. İkinci adımda, MPC’ye ait giriş ve çıkışların, üçüncü adımda ise MPC’ye ait parametrelerin tanımlanması gerekmektedir (Bemporad, Morari ve Ricker, 2018). Dolayısıyla, öncelikle DC motorun durum uzayı gösterimi bağıntı (22)’te verildiği gibi elde edilmiştir. Öngörü süreci kullanılan modelin doğruluğuna bağlı olduğundan, modellemenin mümkün olduğu kadar hatasız olması MPC tasarımında oldukça önemlidir.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K}{L_a} \\ \frac{K}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{t_d}{J} \end{bmatrix} v_a(t) \quad (22)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} D$$

MPC denetleyici tasarımında lineer süreç modeline gereksinim duyulduğundan, MPC Araç Kutusunda, Şekil 8’de gösterildiği gibi, “define and linearize” tuşuna basılarak, süreç modeli lineer olmasa bile, araç kutusu tarafından doğrusal hale dönüştürülmüş olur.





Şekil 8. MPC araç kutusunda süreç modelinin tanıtılması ve doğrusal hale getirilmesi

Süreç modelinin, Şekil 8’de gösterildiği gibi, araç kutusuna tanıtılmasından sonra, araç kutusu kontrol sisteminin giriş ve çıkış sayılarını otomatik olarak belirler. Ancak, giriş veya çıkış değişkenlerinin ölçülebilir olması veya olmaması tasarımcı tarafından değiştirilebilir.

Daha sonra, giriş ve çıkış değişkenlerinin özelliklerinin ve birimlerinin belirlenmesi gerekir. Bu durum Şekil 9’da gösterilmiştir.

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
u(1)	MV	va	Volt	0	1
u(2)	UD	td	N.m	0	1

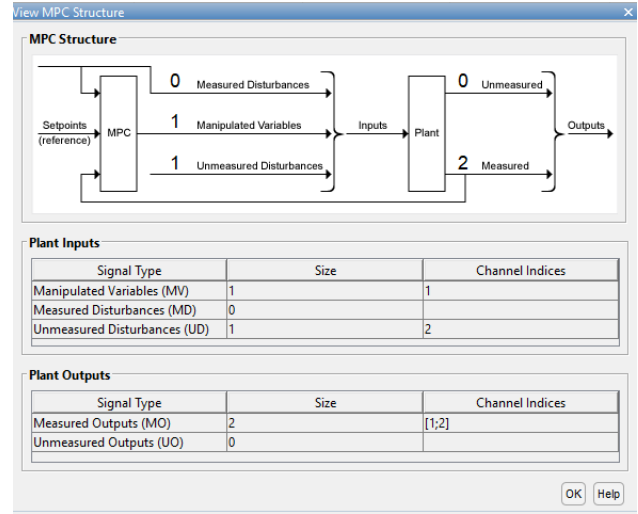
  

Channel	Type	Name	Unit	Nominal Value	Scale Factor
y(1)	MO	Current	Amp	0	1
y(2)	MO	Speed	Rad/Sec	0	1

Şekil 9. MPC IO özellikleri.

Bu çalışmada, DC motorun açısız hızını kontrol etmek ve armatür akım değerini ayarlamak için motor armatür gerilimi giriş değişkeni olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla,  $v_a$  kontrol değişkeni olarak, yük momenti,  $t_d$ , ise

ölçülemeyen bozucu olarak ele alınmıştır. DC motor açısız hız ve armatür akım değerleri ise çıkış değişkenleri olarak seçilmiştir. Bu durum Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. MPC denetleyici yapısı

Gerçek sisteme ait giriş ve çıkış değişkenlerine ait kısıtların araç kutusuna tanıtılması Şekil 11’de verilmiştir.

Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
u(1)	MV	-220	220	-Inf	Inf

Channel	Type	Min	Max
y(1)	MO	-5	5
y(2)	MO	-209.4	209.4

Şekil 11. MPC denetleyici kısıtları

DC motora ait hız ve akım cevapları MPC denetleyicinin ayarlanması ile oldukça yakından ilgilidir. MPC denetleyicinin ayarlanması giriş ve çıkış değişkenlerine atanan ağırlıklar ile belirlenir. Bu çalışmada ağırlıklar şu şekilde belirlenmiştir:

- Giriş gerilim değişkenine 0 ağırlık atanarak denetleyiciye tam bağımsızlık verilmiştir. Böylece, çıkış cevabını istediği gibi, izin

verilen aralıkta, değiştirmesine müsaade edilmiştir.

- Birinci çıkış değişkenine (akım) ikinci akım değişkenine (hız) göre daha büyük bir ağırlık atanmıştır.

Bu çalışmada giriş ve çıkış değişkenleri için seçilen ağırlıklara ait durum Şekil 12’de gösterilmiştir.

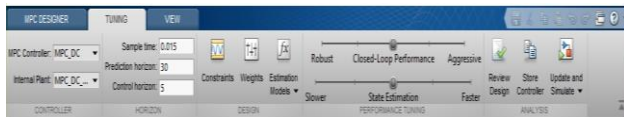
Channel	Type	Weight	Rate Weight	Target
u(1)	MV	0	0.5	nominal

Channel	Type	Weight
y(1)	MO	1
y(2)	MO	0.1

ECR Weight (dimensionless)  
Weight on the slack variable: 33201.1692

Şekil 12. MPC denetleyici ağırlıkların ayarlaması

Sistemin cevabı araç kutusunda yer alan “Performance Tuning” kısmı kullanılarak, Şekil 13’de gösterildiği gibi, Robust (Gülbüz)-Aggressive (Agresif) ve Slower (Yavaş)-Faster (Hızlı) koşulları göz önünde bulundurularak ayarlanır. Ayrıca, örnekleme periyodu, öngörü ve kontrol ufuk değerleri de bu aşamada belirlenmelidir.

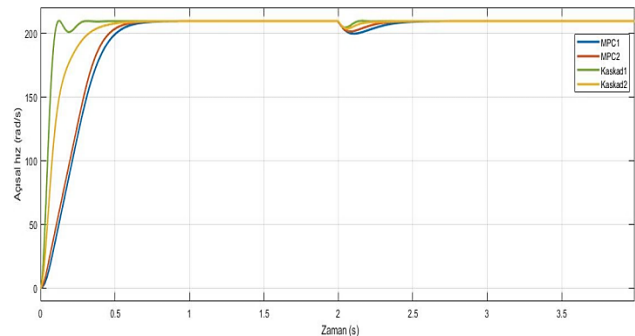


Şekil 13. MPC performans ayarı

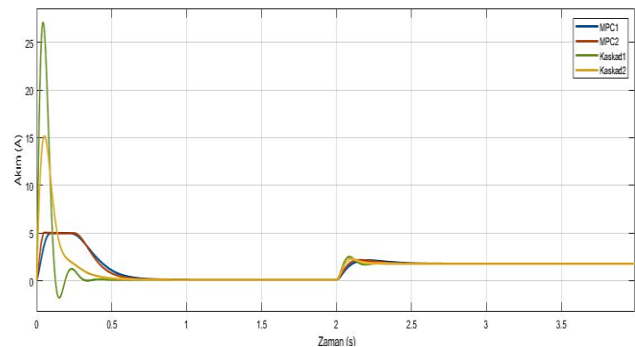
## Sonuçlar ve Tartışma

Tablo 1’de verilen DC motor parametreleri ve bir önceki bölümde anlatılan MATLAB MPC araç kutusu için gerekli değerler kullanılarak MPC denetleyici stratejisine ait benzetim sonuçları

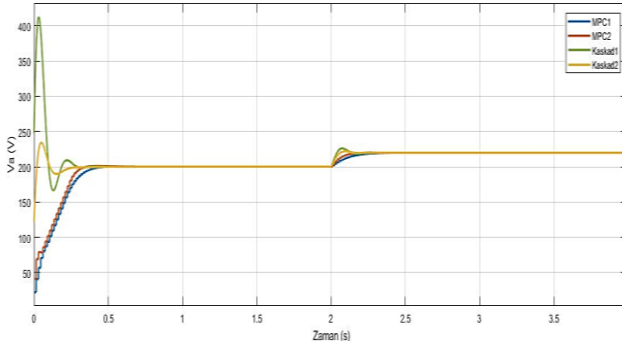
Simulink ile elde edilmiştir. Ayrıca, PI-P denetleyici tasarıma ait benzetim sonuçları da Simulink ile elde edilmiş ve her iki tasarıma ait kapalı çevrim cevaplar Şekil 14 ve 15’te gösterilmiştir. Şekillerde, MPC denetleyici için kapalı çevrim performans ayar bölümünde, orta agresif, agresif ve aşırı agresif durumlar için de cevaplar verilmiştir. PID tip denetleyici ile karşılaştırıldığında MPC denetleyicinin hem açılma hızı hem de akım denetiminde daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. MPC denetleyici ile hem gerilim hem de akım değerlerinin daha önce Şekil 11’de belirlenen sınırlarda kaldığı görülmektedir. Ancak, aşırı agresif durum için akım değeri az da olsa belirlenen sınır aşmıştır. Dolayısıyla, kapalı çevrim performans değerinin orta agresif olarak belirlenmesi gerektiği gözlenmektedir.



Şekil 14. Kaskad ve MPC denetleyiciler için elde edilen açısal hız sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 15. Kaskad ve MPC denetleyiciler için elde edilen akım sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 16. Kaskad ve MPC denetleyiciler için elde edilen kontrol sinyallerinin sonuçlarının karşılaştırılması

Tasarlanan denetleyicilere ait kapalı çevrim kontrol performansları Tablo 2’de özetlenmiştir. Kaskad yaklaşım için her ne kadar yerleşme zaman değerleri daha küçük olsa da, MPC ile denetimde aşmanın olmaması, akım değerlerinin belirlenen kısıtların dışına çıkmaması ve kontrol sinyal genliklerinin küçük olması MPC’nin avantajlarını oluşturmaktadır.

**Tablo 2.** MPC ve Kaskad denetleyici kapalı çevrim performans değerleri

	Yerleşme zamanı	Maksimum yüzde aşım
MPC (Çıkış ağırlıklarını akım için 0 ve hız 0.1 seçilmesi durumu)	0.570	0
MPC (Çıkış ağırlıklarını akım için 1.5 ve hız 0.2 seçilmesi durumu)	0.525	0
Kaskad ( $K_{p_i} = 10$ $\zeta_1 = 0.7$ ve $\zeta_2 = 0.7$ durumu)	0.240	0.131
Kaskad ( $K_{p_i} = 10$ $\zeta_1 = 0.7$ ve $\zeta_2 = 1$ durumu)	0.413	—

## Kaynaklar

Alkurawy, J., and Khamas, N. (2018) ‘Model Predictive Control for DC Motors’, in *1st International Scientific Conference of Engineering Sciences*, pp. 56–61.

- Bangia, S., Jain, S., & Neha. (2015). ‘DC Motor Control System Using Model Predictive Controller’, (02), pp. 1010–1014.
- Bemporad, A. (2016). ‘Recent Advances in Model Predictive Control’. *Institute For Advanced Studies Lucca*.
- Bemporad, A., Morari, M., & Ricker, N. L. (2018). ‘Model Predictive Control Toolbox TM User’s Guide’.
- Boshkovski, G., Stojanovski, G., & Stankovski, M. (2017). ‘Development of Embedded Model Predictive Controller’. In *IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA* (pp. 76–81).
- Burns, S. (2001). ‘Advanced Control Engineering’. London, England: Butterworth-Heinemann.
- Camacho, E. F., & Bordons, C. (2007). ‘Model Predictive Control’. Springer.
- Currie, J., & I. Wilson, D. (2009). ‘A Model Predictive Control Toolbox Intended for Rapid Prototyping’. In *16th Electronics New Zealand Conference (Vol. 2, pp. 7–12)*.
- Dani, S., Sonawane, D., Ingole, D., & Patil, S. (2017). ‘Performance evaluation of PID, LQR and MPC for DC Motor Speed Control’. In *2nd International Conference for Convergence in Technology (Vol. 2017–Janua, pp. 348–354)*.
- E. Durmaz, B., Kaçmaz, B., Mutlu, İ., & Söylemez, M. (2018). ‘Implementation and Comparison of LQR-MPC on Active Suspension System’. In *10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering* (pp. 828–835).
- Gopi, S., Vaidyan, V. M., & Vaidyan, M. V. (2013). ‘Implementation of FPGA Based Model Predictive Control For MIMO Systems’. In *Proceedings, IEEE Conference on Systems, Process and Control, Kuala Lumpur*(pp. 21–24).
- Joe Qin, S., & A. Badgwell, T. (2003). ‘A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology’. In *Control Engineering Practice* 11 (2003) 733–764 (Vol. 11, pp. 733–764). USA: Elsevier Science.
- Krishnani, R. (2010). ‘Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control’. Blacksburg, VA: Prentice Hall.
- Maciejowski, J. (2002). ‘Predictive Control With Constraints’. Prentice Hall.
- Nassani, A.,A., Nassif, M. 2012. ‘Automatic Drive Systems (1) Practical Part’.
- Prasetyo, H. F., Rohman, A. S., & Santabudi, M. R. A. R. (2018). ‘Implementation of Model Predictive Control Using Algorithm-3 on Arduino Mega 2560 for Speed Control of BLDC Motor’. In *Proceeding in 3rd International Conference on*

*Science in Information Technology: Theory and Application of IT for Education, Industry and Society in Big Data Era*, ICSITech 2017 (Vol. 2018-Janua, pp. 642–647).

Šlapák, V., Kyslan, K., Lacko, M., Fedák, V., & Ďurovský, F. (2016). 'Finite Control Set Model Predictive Speed Control of a DC Motor'. Hindawi Publishing, 2016, 1-11.

Syaichu-Rohman, A., & Sirius, R. (2011). 'Model Predictive Control Implementation On A Programmable Logic Controller For DC Motor Speed Control'. In Proceedings of *the International Conference on Electrical Engineering and Informatics, ICEEI 2011* (pp.1–4).

## Model Predictive Controller Design for DC Motor Drive

### Extended Abstract

DC Motor is one of the most popular motors used in industry field and control engineering. Due to its simplicity and easy of implementing variable speed control, DC motors have been widely used in industrial applications. In addition to being an educational system used to apply the bases of control theory, it is also a simple mechanism to find its model. DC Motor can be modelled both by a transfer function or state space representation. For the transfer function representation electrical and mechanical relations can be used to derive it. For the state space representation, relations between state variables can be used.

The purpose behind of this paper is to analyze and design a linearized control system of DC Motor and applying Model Predictive Control (MPC) strategy to investigate and improve the performance of DC motor by adjusting the tuning weights and taking into account system constraints.

The performance of designed MPC has been compared with classical PID type controllers. Hence, first of all, the transfer function of the DC motor from the electrical and mechanical equations describing it was derived. Secondly, a new controller structure called PI-P was suggested. In this structure, a PI controller in an inner loop was used to control armature current of the DC motor. In the outer loop a PI-P controller was used to control the angular velocity of the DC motor. Controller parameters were determined based on the synthesis method.

Simulation results showed that, under the PI-P controller the response for speed and current of the DC motor exceeded the nominal physical limits of the DC motor which are  $I_a = 5\text{ A}$  and  $V_a = 209.4\text{ V}$ . On other hand, the results of the MPC controller were much better and showed a respect to the constraints of the DC motor system in the normal running of the simulation.

To see the effects of the robust and aggressive slider in the MPC toolbox three cases were studied. It has been observed that the mid-aggressiveness case the response for speed and current of the DC motor was stayed in the nominal physical limits of the DC motor. However, for aggressiveness and hard aggressiveness cases very slightly faster responses

for the angular velocity of the DC motor were obtained. Nevertheless, it has been seen that the armature current of the DC motor slightly exceeds the physical constraint of DC motor. Therefore it can be concluded that for the best performance, the Matlab MPC toolbox should be used with mid-aggressiveness.

This study provided results of applying one of the Model Predictive Control (MPC) strategies, which is relying on mathematical models of the DC motor, to show how this strategy works, and prove the active role that can be done by these controllers within advanced industrial systems. A comparison with classical PID controllers was given to show the high performance of MPC and test its strength.

**Keywords:** Model Predictive Control (MPC), DC Motor, PI-P Controller, Matlab, Simulink, MPC Toolbox.

## A Hardware and Mobile-Health Based System for the Analysis of EEG Signals

Turgay KAYA<sup>1,\*</sup>, Seda ARSLAN TUNCER<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Firat University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, 23119, Elazig, Turkey, 0000-0002-7732-6194

<sup>2</sup> Firat University, Faculty of Engineering, Department of Software Engineering, 23119, Elazig, Turkey, 0000-0001-6472-8306

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 August 2019

Received in revised form 16

September 2019

Accepted 19 September 2019

Available online 26 September 2019

#### Keywords:

FPGA, FIR filter, cosh window, EEG, android application.

### ABSTRACT

Instantaneous monitoring of EEG signals is very important for patient follow up. Independent follow-up systems are needed for the physician to monitor and diagnose the patient continuously. In this article, a real-time design for an FIR (Finite Impulse Response) filter was presented using a cosh window function implemented on an FPGA (Field Programmable Gate Array) environment. The reason for using the cosh window is that it has better ripple ratio and larger sidelobe roll-off ratio than other windows in literature. Since cosh window parameters can be changed in the developed design, they can be easily adapted to the new state change. After filtering the raw EEG signals, they were converted into a form that could be interpreted by a specialist physician. The filtered data was uploaded to a server on the internet so that the physician could access the EEG signals remotely via a mobile phone. The proposed system facilitated examination of the patient by the physician and made it possible to help instantly diagnose any illness.

Doi: 10.24012/dumf.600242

### Introduction

EEG signals are biological indicators of low amplitude taken from the brain's surface by means of electrodes. In general, the amplitudes of the EEG signals are at the microvolt level and classified into five sub-bands: delta = (0.5 to 4 Hz), theta = (4 to 8 Hz), alpha = (8 to 12 Hz), beta = (12 to 32 Hz) and gamma = (32 to 100+ Hz). The low amplitude of these signals makes it difficult to analyze the signals correctly. However, EEG signals are used in many areas, such as epilepsy, head trauma and sleep related disorders [1–3]. Raw EEG signals obtained from the patient include noise generated by the network frequency and various other causes in the environment. Noise should be removed from the

raw signals so that the EEG signals from the patient can be diagnosed correctly.

The numerical filter types used in published literature for signal noise removal are either FIR (Finite Impulse Response) or IIR (Infinite Impulse Response). FIR filters are used in many applications due to their stable behavior. In the Fourier series method used in FIR filter design, window functions are used to eliminate Gibbs oscillations occurring due to the limited number of received terms [4]. These functions are preferred in many areas, such as the classification of cosmic data [5, 6], in weather forecasting models [7], in the biomedical field [8] and in speech processing [9].

\* Corresponding author  
Turgay KAYA  
✉ tkaya@firat.edu.tr

Window functions are divided into two groups: those with fixed and those with adjustable parameter windows [10]. Fixed windows control the width of the main lobe through window length  $N$ , while adjustable window functions can provide a more useful window amplitude spectrum with two or more independent variables. Among adjustable window functions, two-parameter windows include Dolph-Chebyshev [11], Kaiser [12, 13] and Saramaki [14]. The cosh window, which was developed from the Kaiser window equation, is widely used in published scientific literature [15]. This window function provides a better performance for adjusting the spectral parameters than other windows in literature, such as the width of the main lobe, the fluctuation rate and the side lobe reduction rate with the help of the  $\alpha c$  variable parameter. More successful results are obtained when signal noise is eliminated with the help of FIR filter designs using window functions with good characteristics.

FPGA hardware is commonly used in processing real-time signals. FPGAs are used in many different areas, such as chaotic system applications [16], random number generators [17] and emotional robot control applications [18]. FPGAs are also used in digital filter design and applications because of their advantages, like hardware features, speed and ease of use [19, 20].

It is very important that noise can be removed from the EEG signals being processed, because this allows the doctor to interpret and diagnose the disease through signal analysis. There have been recent studies on obtaining bioelectrical signals in real time and presenting and interpreting them in the mobile environment [21–25].

To the best of our knowledge, no studies have been reported so far in literature on the hardware-based analysis of EEG signals and their presentation via the mobile environment. Therefore, this has motivated us to look at further studies and investigations.

The contribution of this article to literature includes:

- The processing of EEG signals, one of the biomedical signals, in an FPGA hardware environment

- The elimination of EEG signal interference in the FPGA environment by using an FIR filter design based on the cosh window function

- A design with IP cores utilizing the floating point number system

- The proposed use of an android-based mobile system for independent access by doctors to the filtered EEG signals.

For this purpose, we suggested a system to remove noise in the EEG signals and for the doctor to diagnose illnesses through analysis of these signals independent of their location. Firstly, noise was removed from the EEG signals with the help of the FIR filter designed using the cosh window function in the FPGA environment. Secondly, the filtered signal was recorded by a computer from the FPGA environment and then stored in a database on the internet. Consequently, it is then possible to access the data at any time with the developed android software, and doctors can access the EEG signal records in the database independent of their location. As a result, interpretation of the EEG signals for disease diagnosis was facilitated and an instantaneous follow-up on the patient was provided.

## FIR Filter

### The use of a Window Function in the FIR Filter Design

The most preferred method for FIR filter design is the Fourier series method. This presents less of a computational burden than other optimization methods. In the Fourier series method, Gibbs oscillations occur in response to the ideal prototype filter amplitude when using a limited number of series. Window functions are used to remove these oscillations. The non-causal filter impulse response is obtained using the window function in Equation 1:

$$h_{nc}(nT) = w(nT)h_{id}(nT) \quad (1)$$

where  $h_{id}(nT)$  indicates the infinite impulse response of the ideal filter. The amplitude response of the ideal filter is shown in Equation 2:

$$h_{id}(nT) = \begin{cases} w_{ct}T/\pi & \text{for } n = 0 \\ \frac{\sin w_{ct}nT}{n\pi} & \text{for } n \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

The non-causal ideal filter response is made to be causal by shifting it  $h_{nc}(nT)$   $(N-1)/2$  times. The causal filter equation can be obtained by using Equation 3:

$$h(nT) = h_{nc}\left[\left(n - \frac{N-1}{2}\right)T\right] \quad (3)$$

The window function used in the filter design and the fluctuation in the pass and stop bands, will be approximately the same [12].

**Cosh Window**

The cosh window function is obtained by writing the cosh function in the Kaiser window function rather than the zero-order first type improved Bessel function ( $I_0(x)$ ) [15].

$$\omega_c(n) = \begin{cases} \frac{\cosh\left(\alpha_c\sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}\right)}{\cosh(\alpha_c)} & |n| \leq \frac{N-1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

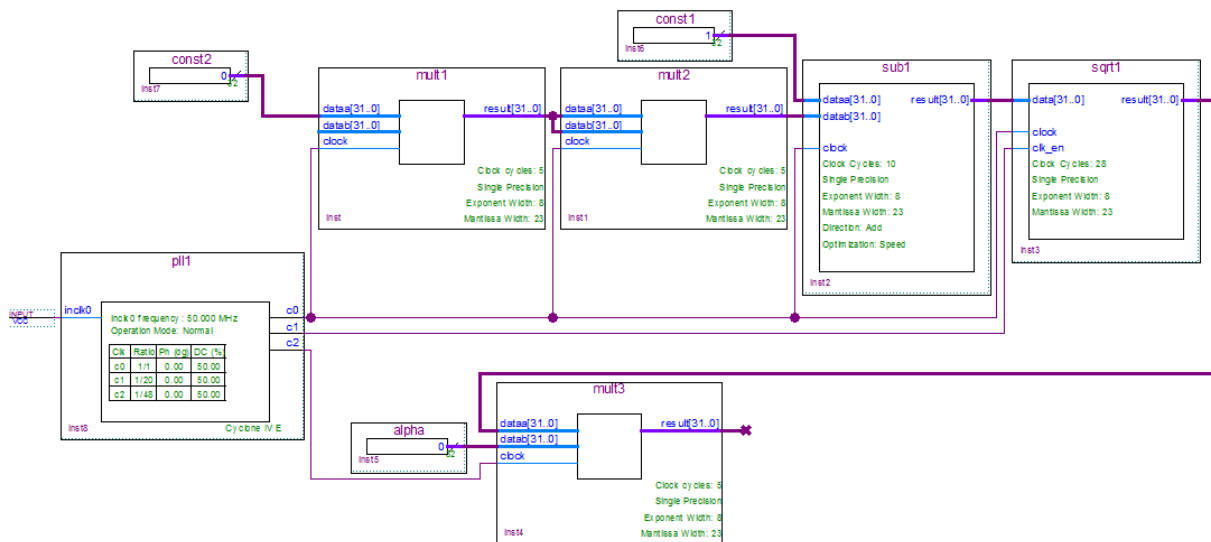
where  $\alpha_c$  is the adjustable parameter and  $N$  is the length of the window.

**Implementation of the FIR Filter and Cosh Window Function in FPGA**

The first step in the FIR filter design was to design the window function to be used. In this section, the design of the cosh window, which is widely used in published literature, and has good spectrum parameters, was implemented step by step in the FPGA environment. The reason for using the cosh window is that it has better better ripple ratio and larger sidelobe roll-off ratio than other windows in literature.

For the cosh function, first the expression  $\alpha_c\sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}$  in Equation 4 was calculated with values of  $N=29$  and  $\alpha_c=4.5$ , followed by the calculation of a value for  $w_c(n)$ . Since cosh window parameters can be changed in the developed design, they can be easily adapted to the new state change. Figure 1 shows the circuit

designed to calculate  $\alpha_c\sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}$  in the Quartus environment.



**Figure 1:** the realization of  $\alpha_c\sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1}\right)^2}$



Available modules that can operate with floating point numbers were used to implement the circuit. Three multiplication modules, one subtraction module and one extraction module were used in the circuit. To calculate the result of applied values to the inputs of each multiplication, subtraction and extraction module, 5, 10 and 28 clock cycles were needed, respectively. A phase locked loop (PLL) circuit was also used to synchronously calculate  $w(n)$ . The PLL has the ability to divide or multiply the clock signal applied to its input. The clock signal was converted to clock signals c0, c1 and c2 by utilizing this feature so that the circuit can operate synchronously. The clock signal used in the system was 400 MHz, while the signals c0, c1 and c2 were 400, 20 and 7.548 MHz,

respectively. The values obtained from the input values were then used as inputs to the exponential modules in Figure 2 to calculate  $w_c(n)$ . As already known, the cosh function can be written as shown in Equation 5:

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \tag{5}$$

The circuit scheme used to obtain the result of Equation 4 by using Equation 5 is shown in Figure 2. In this circuit, exponential, summation and division modules were used. These modules gave clock cycle values of 17, 10 and 6, respectively. For  $n=0, 1, 2, \dots, (N-1)/2$ ,  $w_c(n)$  is calculated at 228.7 kHz.

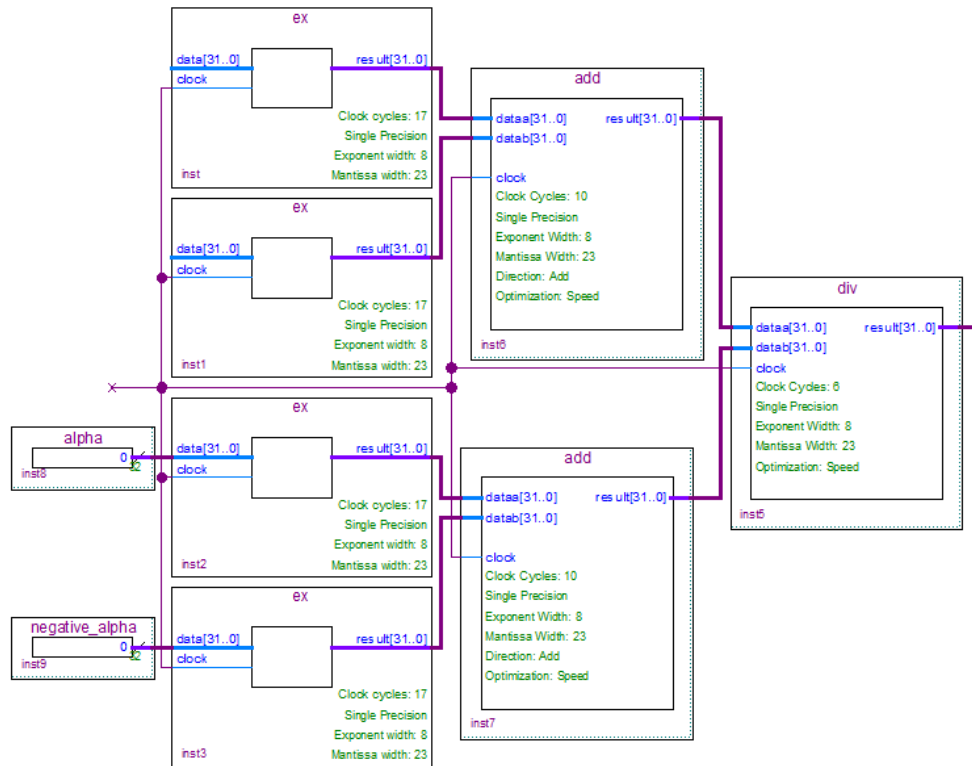
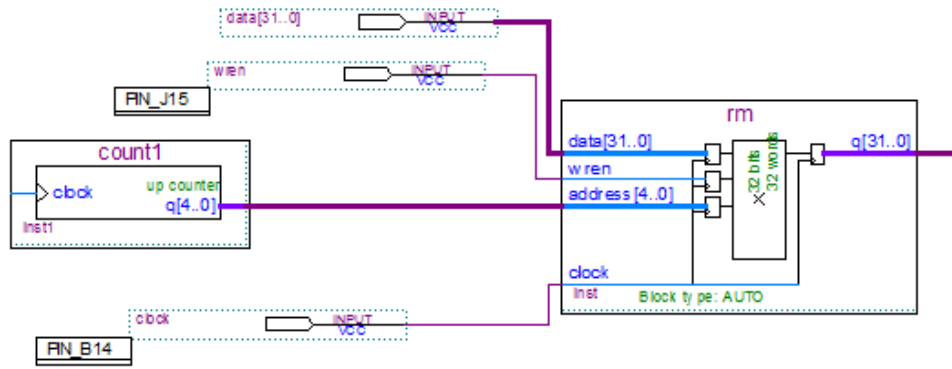


Figure 2. The implementation of Equation 4 in FPGA

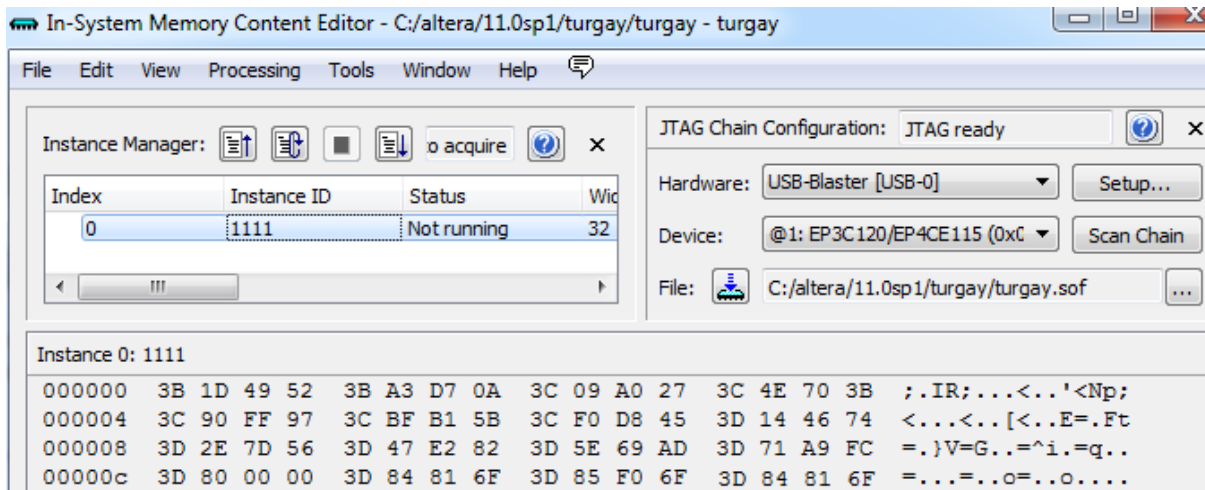
To show the consistency of the results obtained with mathematical results, each result was recorded in a memory circuit at 228.7 kHz. Figure 3 shows the memory hardware required to

write each value to memory. A 5-bit counter was used to write the results to the desired addresses in the memory. The counter frequency was the same as the memory clock frequency.



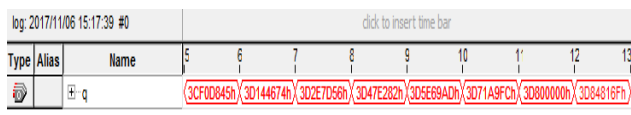
**Figure 3.** The design used to write the results into memory

In this application, the results were obtained using values of  $N=29$  and  $\alpha_c=4.5$ . Figure 4 shows the results written into each address of the memory in the hexadecimal number system.



**Figure 4.** Hexadecimal results written into memory for values  $N=29$  and  $\alpha_c=4.5$

The results obtained from the q output in Figure 3 are shown in Figure 5. First, eight values obtained at 228.7 kHz are seen. Because the q output is formed from a 32 byte bus structure, the corresponding hexadecimal values for each calculated value are given.

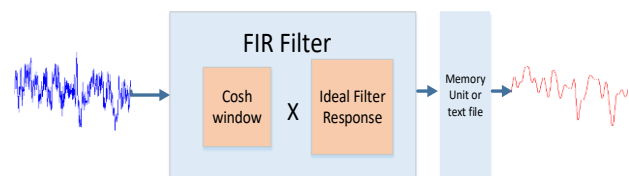


**Figure 5.** Real-time results calculated for values of  $N=29$  and  $\alpha_c=4.5$

### The Application Results

The first step in the method used by the physician to analyze the EEG signals is the design of the cosh window and the FIR filter using this window, as described in Section 3. Figure 6

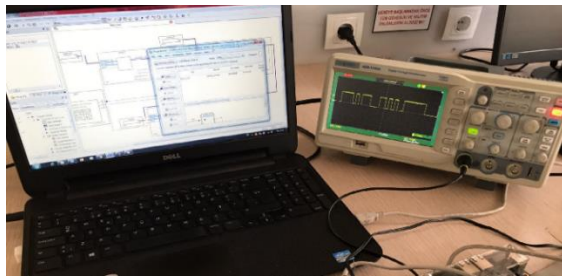
shows the block diagram of the structure implemented in the FPGA environment and used for removal of noise from the raw EEG signal.



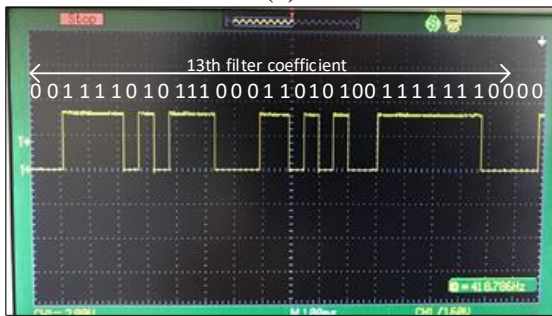
**Figure 6.** The block diagram representing the filtering of the EEG signal in the FPGA environment

The experimental environment for the system design is shown in Figure 7a, while the binary number system representation for the FIR filter coefficient example at the output of the storage unit where EEG signals are stored is shown in Figure 7b. This coefficient is  $(3D71A9FC)_H$  –

based on the hexadecimal number system in the IEEE 754 format – and it is 0.059 according to the floating number system.



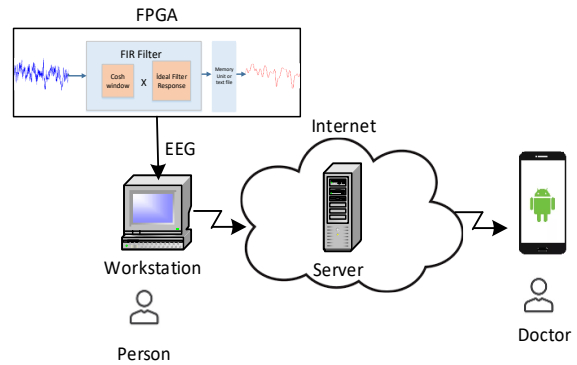
(a)



(b)

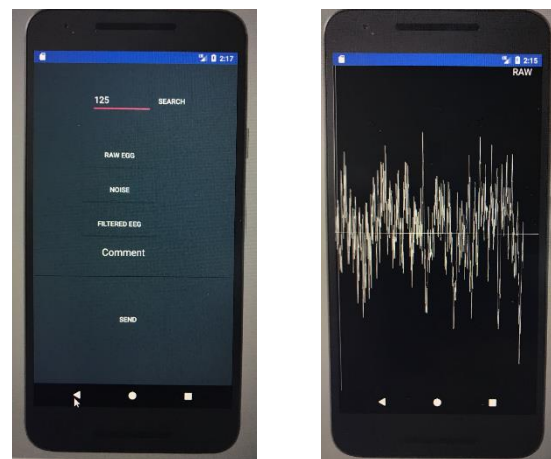
**Figure 7. a)** The experimental setup **b)** 13<sup>th</sup> filter coefficient

The second step of this system design is the remote access to the data by a doctor. For this step, an android-based system was developed so that the doctor can follow the patient remotely and diagnose any disease. In Figure 8, the system is shown to consist of an android application, a server where the data is stored, and an FPGA. The noise-free EEG signal (a file in txt format) is recorded in a database on the internet with the help of a user interface designed on a workstation. The sampled EEG signals in the file are in an array format. The samples obtained by splitting this sequence are stored in a table along with the patient ID. The doctor connects to the database with the android application, using his/her domain name. In this procedure, the doctor can obtain the patient ID and the EEG signals in the table in the Json data format. Json is a data format created for JavaScript applications that takes up less space than XML when transferring data. Thus, it is possible to display and interpret the EEG signals in the Json format using the android application using a mobile phone independent of location.



**Figure 8.** The block representation for the suggested system

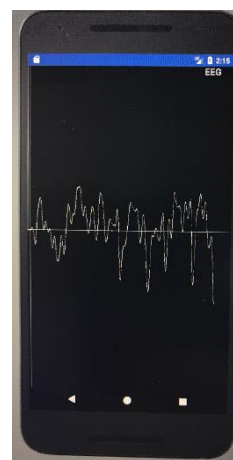
The interface that allows the doctor to access the EEG signals using the android application is shown in Figure 9a). In Figures 9b–d, the patient’s raw EEG signal, noise-free EEG signal and noise signal are shown using the patient’s patient ID number, respectively.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 9. a)** The interface for the android application **b)** The raw EEG signal **c)** The unfiltered EEG signal and **d)** The noise signal

## Conclusion

In this study, a system was proposed to remove the noise from the EEG signals taken from the patient and allow the doctor to follow and diagnose the patient independent of location. With this proposed system, the received EEG signal was processed using the window and FIR filter designed in the FPGA environment. The processed EEG signals were stored in a database so that the physician could access the online data with android software. The ability for the doctor to be able to follow up a patient's progress is of great importance in terms of monitoring any disease. This study makes it easy to instantly monitor, analyze and diagnose the EEG data. The developed system has two important contributions to make to published literature. The first contribution is that the system is designed in hardware and allows the data to be processed in real time. The second contribution is that the physician can remotely access the patient's data independent of location to diagnose any disease.

## References

- 1- Kocadagli, O., Langari, R., Classification of EEG signals for epileptic seizures using hybrid artificial neural networks based wavelet transforms and fuzzy relatio, *Expert Systems with Applications*, **2017**, 88, (1), p. 419-434.
- 2- Vaewpanich, J., Reuter-Rice, K., Continuous electroencephalography in pediatric traumatic brain injury: Seizure characteristics and outcomes, *Epilepsy & Behavior*, **2016**, 62, p, 225-230.
- 3- A.Barone, D., Chokroverty S., Neurologic Diseases and Sleep, *Sleep Medicine Clinics*, **2017**, 12, (1), p, 73-85.
- 4- S.W.A. Bergen, A. Antoniou, "Design of Nonrecursive Digital Filters Using the Ultraspherical Window Function", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2005, 12, 1910-1922.
- 5- E. Torbet, M. J. Devlin, W. B. Dorwart, et al., "A measurement of the angular power spectrum of the microwave background made from the high Chilean Andes," *The Astrophysical Journal*, 1999, vol. 521, pp. L79-L82.
- 6- B. Picard, E. Anterrieu, G. Caudal, and P. Waldteufel, "Improved windowing functions for Y-shaped synthetic aperture imaging radiometers," in Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '02), vol. 5, pp. 2756-2758, Toronto, Ont, Canada, June 2002.
- 7- P. Lynch, "The Dolph-Chebyshev window: a simple optimal filter," *Monthly Weather Review*, vol. 125, pp. 655-660, 1997.
- 8- M. Dessouky, H. Sharshar, Y. Albagory, "A novel tapered beamforming window for uniform concentric circular arrays", *Journal of Electromagn. Waves and Appl*, 2006, 20/4: 2077-2089.
- 9- A. Antoniou, "Digital signal processing: signal, systems, and filters", New York: McGraw-Hill; 2005.
- 10- D. Ashutosh, J. Alok, CS. Pramod, "Design and performance analysis of adjustable window functions based cosine modulated filter banks", *Digital Signal Processing*, 23/1: 412-417, 2013.
- 11- C.L. Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and side-lobe level", *Proc. IRE*, June, 34, 335-348, 1946.
- 12- J.F. Kaiser, "Nonrecursive digital filter design using  $I_0$ -sinh window function", *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, San Francisco, Calif., USA, 20-23 April, p. 20-23, 1974.
- 13- J.F. Kaiser, R.W. Schafer, "On the use of the  $I_0$ -sinh window for spectrum analysis", 1980, *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28/1, 105- 107.
- 14- T. Saramaki, "Finite impulse response filter design", in *Handbook for Digital Signal Processing*, S.K. Mitra and J.F. Kaiser, Eds. Wiley & Sons, New York, NY, US, 1993.
- 15- K. Avci, A. Nacaroglu, "Cosh window family and its application to FIR filter design", *International Journal of Electronics and Communications-AEU*, **2009**, 63 906-917.
- 16- E. Avaroglu., T. Tuncer, A.B. Ozer, B. Ergen, M. Turk, A novel chaos-based post-processing for TRNG. *Nonlinear Dyn.*, **2015**, 1-11.
- 17- E. Avaroglu., T. Tuncer, A.B. Ozer, M. Turk, "A new method for hybrid pseudo random number generator". *J. Microelectron. Electron. Compon*, **2014**, 4(4), 303-311.
- 18- C. Dominguez, H. Hassan, A. Crespo, "Emotional robot control architecture implementation using FPGAs", *Journal of Systems Architecture*, **2017**, 72, 29-41.
- 19- M.G. Egila, M.A. El-Moursy, A. E.El-Hennawy, H.A. El-Simary, A. Zaki, "FPGA-based electrocardiography (ECG) signal analysis system using least-square linear phase finite

- impulse response (FIR) filter”, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 3, 513–526, 2016.
- 20- R. Lehto, T. Taurén, O.Vainio, “ Recursive FIR filter structures on FPGA”, *Microprocessors and Microsystems*, **2011**, 35, 595–602.
- 21- EL Menshawy, M., Benharref, A., Serhani, M., An automatic mobile-health based approach for EEG epileptic seizures detection, *Expert Systems with Applications*, **2015**, 42, (20), p, 7157-7174.
- 22- Khairul Azami Sidek, Vu Mai, Ibrahim Khalil, Data mining in mobile ECG based biometric identification, *J. Netw. Comput. Appl.* **2014**, 44,83–91.
- 23- Serhani M.A., M. El Menshawy, A. Benharref, S. Harous, A.N. Navaz, New algorithms for processing time-series big EEG data within mobile health monitoring systems, *Comput. Methods Programs Biomed.*, **2017**, 149, 79–94.
- 24- Tuncer, S. A., Alkan, A., Segmentation of thyroid nodules with K-means algorithm on mobile devices, *2015 16th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*, Budapest, pp. 345-348, 2015.
- 25- Sárkány, N., Tihanyi, A., Szolgay, P., The design of a mobile multi-channel bio-signal measuring system for rehabilitation purposes, *14th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and their Applications (CNNA)*, 2014.



# Şebekeye Bağlı Güneş Enerjisi Santrallerinin Harmoniklerine Etki Eden Parametrelerin Araştırılması

**Emre NEDİMOĞLU**

Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Diyarbakır  
wesamshagory66@hotmail.com ORCID: 0000-0002-5665-1924, Tel: (534) 585 18 63

**Bilal GÜMÜŞ\***

Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
bilgumus@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0003-4665-5339

Geliş: 11.08.2019, Revizyon: 06.09.2019, Kabul Tarihi: 20.09.2019

## Öz

Küresel iklim değişikliğinin önlenmesi amacıyla yapılan çalışmalar ve geliştirilen politikalar enerji üretiminde, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını hızla artırmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin şebekeye bağlantısı, güvenlik, güç kalitesi ve yönetim açısından önem arz etmektedir. Azalan kurum maliyetleri güneş enerjisinden elektrik üreten sistemlerin kullanımını yaygınlaştırmıştır. Şebeke bağlantılı güneş enerji santrallerinin şebekeye bağlantılarında en önemli sorunlardan birisi de sistemden kaynaklanan harmoniklerdir. Şebeke bağlantısında kullanılan eviriciler harmonik üretimine neden olmaktadır. Oluşan harmonikler şebekenin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Bu çalışmada şebekeye bağlı güneş enerjisi santrallerinin oluşturduğu harmonik etkiler araştırılmıştır.

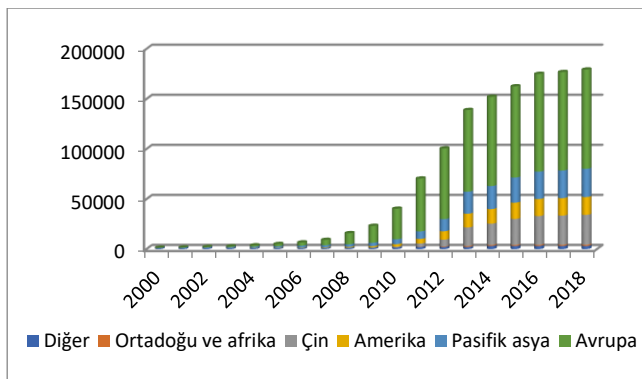
Bu amaçla öncelikle fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetim gerçek bir güneş santralinden alınan harmonik verileriyle karşılaştırılmıştır. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır. Güneş santrallerinde oluşan harmonikler üzerinde ışımanın ve sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Birinci incelemede sıcaklık sabit iken ışımanın değişiminin harmonik üzerine etkisi araştırılmıştır. İkinci inceleme de ise ışıma sabit iken sıcaklık değişiminin harmonikler üzerindeki etkisine bakılmıştır. Sistemde kullanılan filtrenin harmonikler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bunun yanında, harmoniklerin azaltılması için öneriler de bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Fotovoltaik, Harmonik, Evirici, Güneş Işınmı, Güç kalitesi, Yenilenebilir Enerji, Toplam Harmonik Bozulma faktörü

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları, artan enerji talebi ile daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde yenilenebilir enerji kaynakları, enerji üretilmesinde temiz ve ucuz bir alternatif olarak tercih edilmektedir. Birçok yenilenebilir enerji türü vardır ve bunlardan en önemlisi de güneş enerjisidir. Dünyada elektrik dağıtım şebekelerine bağlı fotovoltaik (PV) güneş enerjili elektrik üretim sistemlerinin sayısı hızla artmaktadır (Haydaroğlu ve Gümü, 2017). Güneş enerjisi, yeryüzünün her yerinde geniş ölçüde mevcut olan bir enerji türüdür ve fotovoltaik yolla (PV) enerji üretimi sırasında kirletici madde yaymayan ve çok az su tüketen temiz, yenilenebilir bir enerji kaynağı sunar. Fotovoltaik enerji üretim sistem kurulum maliyetlerinin hızla düşmesiyle dünya genelinde enerji üretiminde güneş enerjisinin payı da hızla artmaktadır. Elektrik enerjisinin ihtiyacı karşılayabilmek için şebeke bağlantılı fotovoltaik güneş enerjisi santrallerinin kurulumu yönünde destek ve teşvikler çıkarılmıştır (Dinçer, 2011). Şekil 1'de 2000-2018 yılları arasında Dünya genelinde kurulmuş güneş enerjisi santrallerin kapasite gelişimi gösterilmiştir. Şekle bakıldığında görüldüğü gibi 2008 yılında sadece 15.844 MW olan güneş santrali kurulu gücü, hızlı bir şekilde artarak 2018 sonunda on iki katına kadar büyümüştür (Çelikkaya, 2018).



Şekil 0. Dünya Genelinde 2000 ve 2018 Yılları Arasında Kurulmuş Fotovoltaik Santral Kapasitesinin Gelişimi

Güneş santralleri Dünyanın enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılayabilecek potansiyele

sahiptir. Güneş enerjisi santralleri, yenilenebilir enerjiden faydalanmak için kullanılan sistemlerin başında gelmektedir. Bu enerji türü elektrik sistemlerine çok önemli yararları sağlarken bazı olumsuzlukları da bulunmaktadır (Çelebi ve Çolak, 2005).

Türkiye'deki güneş enerjisi santrallerinin gelişiminde dünyadaki gelişime paralel olarak son yıllarda büyük bir artış yaşanmaya başlamıştır. Türkiye'de büyük güçte fotovoltaik santralleri bulunmamakla beraber, 2019 yılı Mayıs ayına kadar kurulmuş sistemlerin toplam kapasitesi 5.374,6 MW'tır ve bu sistemlerin büyük kısmı şebekeyle bağlantılı sistemlerdir (TEİAŞ 2019). 2019 yılı itibariyle Türkiye'nin en büyük fotovoltaik güneş enerjisi santrali Kayseri OSB'de kurulan 55 MW'lık santraldir. Bu santral ile kurulduğu organize sanayi bölgesinin ihtiyacı olan elektrik enerjisinin yaklaşık %25'inin üretilmesi öngörülmektedir (Yeşil Ekonomi, 2019). 2019 yılı Mayıs ayı itibariyle farklı üretim kaynaklarına göre Türkiye'deki kurulmuş santrallerin güçleri ve dağılımı Çizelge 1'de gösterilmiştir (TEİAŞ, 2019).

Çizelge 0. 2019 Mayıs Sonu İtibarı ile Türkiye'deki Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Dağılımı

Üretim Kaynağı	Kurulu Gücü [MW]	Yüzdesi
İthal Kömür	8.938,9	% 10
Taş Kömürü, Linyit, Asfaltit	11.057,8	% 12,3
Fuel Oil, Nafta, Motorin	492,9	% 0,5
Hidrolik Akarsu	7.848,7	% 8,8
Hidrolik Barajlı	20.554,2	% 22,9
Biyokütle, Atık Isı	997,5	% 1,1
Rüzgâr	7.085,4	% 7,9
Jeotermal	1.302,5	% 1,5
Güneş	5.374,6	% 6
<b>Toplam</b>	<b>89.680,5</b>	<b>% 100</b>

Çizelgeden, güneş santrallerinin, toplam kurulu güç içerisindeki oranının %6 olduğu görülmektedir. Bu oranın gelecek yıllarda daha fazla olması beklenmektedir.

## Güç Kalitesini Etkileyen Parametreler

Güneş enerjisi santrallerinde güç kalitesi sorunları aşağıdaki maddeler halinde sıralanabilir (Kocatepe ve ark., 2003):

### ▪ Geçici rejim gerilimi

Şebekede oluşan kısa devreler, doğa olayları ve şebekenin anahtarlanması veya yük değişimi gibi nedenlerle ortaya çıkan geçici rejimlerde yaşanan gerilim bozulmaları ve dengesizlikleri sistemin anma geriliminden farklı gerilimler ile çalışmasına neden olabilmektedir.

### ▪ Sürekli gerilim değişimleri

Yenilenebilir enerji kaynaklarında, çıkış gücü gerilim seviyesinde genel anlamda artış veya düşüşler gözlenebilmektedir. Uluslararası standartlara göre yüksek gerilim sistemlerinde bu değişim  $\pm 10\% V_{rms}$  toleransını sağlamalıdır.

### ▪ Gerilim dengesizliği

Güç kalitesini etkileyen diğer bir önemli etken de gerilim dengesizliğidir. Gerilim dengesizliği, dengeli ve eşit olması gereken üç fazlı sistemlerde, fazlar arasındaki gerilim farklarından kaynaklanır. Fotovoltaik sistemde buna benzer meydana gelen faz farkları, dağıtım şebekesinin fazlarını da etkiler.

### ▪ Dalga formu bozulumu- harmonikler

Harmonik dalgalar, şebeke frekansının birkaç katı şeklinde ortaya çıkan frekans salınımlarıdır. Fotovoltaik sistemde buna neden olan durum, bu sistemlerde kullanılan ve non-linear karaktere sahip yarı iletken anahtarlardır. Anahtarlamada da kullanılan yöntem de harmoniklere çok etki eder.

### ▪ Gerilim dalgalanmaları ve gerilim titremeleri (kırışması)

Sağlıklı bir şebekede, 50 Hz frekansında ve saf bir sinüs dalgası şeklinde olması gerekir. Fakat her zaman bu durum geçerli değildir. Şebeke gerilimi bazen daha düşük frekanslarda salınımlar yapabilir. Gerilim titremeleri, sürekli yükteki gerilim dalgalanmalarından kaynaklı

aydınlatma armatürlerinde titremelere neden olan 50 Hz'den düşük gerilim salınımlarıdır. Titreme şiddeti, gerilim dalgalanmalarının genlik, şekil ve tekrarlanma sıklığı gibi faktörlerine bağlı olup birtakım yaklaşımlar ile tahminleri mümkündür.

▪ **Güç frekans değişimleri** Frekans güç kalitesi hususunda en önemli etkenlerden bir tanesidir. Güç arzında ve talebindeki dengesizlikler, frekans salınımlarına neden olurlar. Bundan ötürü şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke frekansı ile sistem frekansı senkronize edilmelidir (Kocatepe ve ark., 2003).

Güç kalitesi standartları, IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) ve IEC (International Electrotechnical Commission) konsorsiyumuyla hazırlanmaktadır. Güç kalitesini etkileyen sebepler;

- Yarı iletken teknolojisiyle üretilmiş ekipmanların güç elektroniği ekipmanlarına göre daha hassas olması durumu, güç kalitesinin düşümüne neden olabilmesi,
- Şebekelerde kullanılan kondansatör ve verimi yüksek motor sürücüler gibi ekipmanların harmonik bozunumları arttırması,
- Birbiriyle enterkonnekte olan şebeke elemanlarından birinde yaşanan sıkıntının diğer noktaları da etkilemesi,

olarak sıralanabilir (Rashid, 1995, Arillaga 1997).

## Güneş Santrallerinde Güç Kalitesi

Fotovoltaik güneş santral kurulumları şebeke gerilimini, özellikle gerilim dalgalanmalarını, kırışmayı, harmonik bozulmayı ve yüksek frekans bozukluklarını önemli ölçüde etkileme potansiyeline sahiptir (Akdeniz, 2006; Moazzenzadeh, Şekerci, 2010; Şimşek, Bizkevelci 2013; Du, Lu, 2018). PV santralleri, eviricilerin oluşturduğu akım harmoniklerini şebekeye enjekte ederek ve tesis içindeki kapasitif elemanlar nedeniyle şebekede harmonik empedans rezonanslarına neden olarak şebekenin harmonik



performansını etkiler. Eviricilerin güç devrelerindeki yarı iletken anahtarların yüksek frekansla anahtarlanması yüksek frekanslı bozulmalara, neden olabilir (Schlabach ve Gross, 2007; Hong ve Zuercher, 2010; Sefa ve Altın, 2009).

Eviricilerden kaynaklanan harmonikler, anahtarlama kontrol yöntemi olan PWM (pulse width modulation) modülasyon şeması, kontrol tekniği ve benimsenen anahtarlama sırasına bağlıdır. AC akımlarının harmonik bozulması, bir PWM şemasındaki anahtarlama frekansının artmasıyla doğrusal olarak azalır. Bununla birlikte, yüksek güç dönüştürücülerinin anahtarlama frekansı, yarı iletken cihazların anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik uyumluluk hususları nedeniyle genellikle birkaç kilohertz ile sınırlıdır (Rao ve Srikanth, 2016).

### Harmonik büyüklüklerinin tanımı

Harmonik büyüklüklerin değerleri ne kadar küçük olursa, enerji tesislerindeki akım ve gerilimin değeri sinüs eğrisine daha yakın olur. Saf sinüs eğrisi durumunda harmonik bulunmayacağından, harmoniklerin değeri matematiksel olarak sıfır olacaktır. Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüm harmonik bozulma denilen kavramdır. Sinüzoidal şekli dalgadan uzaklaşmayı, bozulmayı diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem akım hem de gerilim için verilebilir. Toplam harmonik bozulma faktörü kısaltılarak THD ile belirtilir (Çelebi ve Çolak, 2005).

### Toplam Harmonik Bozulma

Toplam harmonik bozulma gerilim veya akım için harmoniklerin etkin değerlerin, ana harmonik etkin değerine bölünmesiyle çıkan orandır. Toplam harmonik bozulma faktörü bütün harmoniklere ait olan etkilerin toplamını nitelemektedir. Harmonik seviyelerin (üçüncü, beşinci, yedinci, vb.) temel harmonik seviyesine göre belirlemede gözden kaçırılmayan en önemli

ölçümlerden biridir. Akım ve gerilim için verilebilir. Gerilim için THD:

$$[\text{THD}]_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} v_h^2}}{v_1} \quad (1)$$

ile hesaplanır.

Burada  $V_h$  Harmonik bileşen gerilimi,  $V_1$ : gerilimin temel bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

THD<sub>i</sub>, akım için Toplam Harmonik Bozulma'yı ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$[\text{THD}]_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{i_1} \quad (2)$$

Burada  $I_h$  Harmonik bileşen yük akımı,  $i_1$  ana bileşen akımıdır (Rashid,1995; Arrilaga ve ark. 1997; Schlabach ve Gross, 2007).

## Araştırma Bulguları

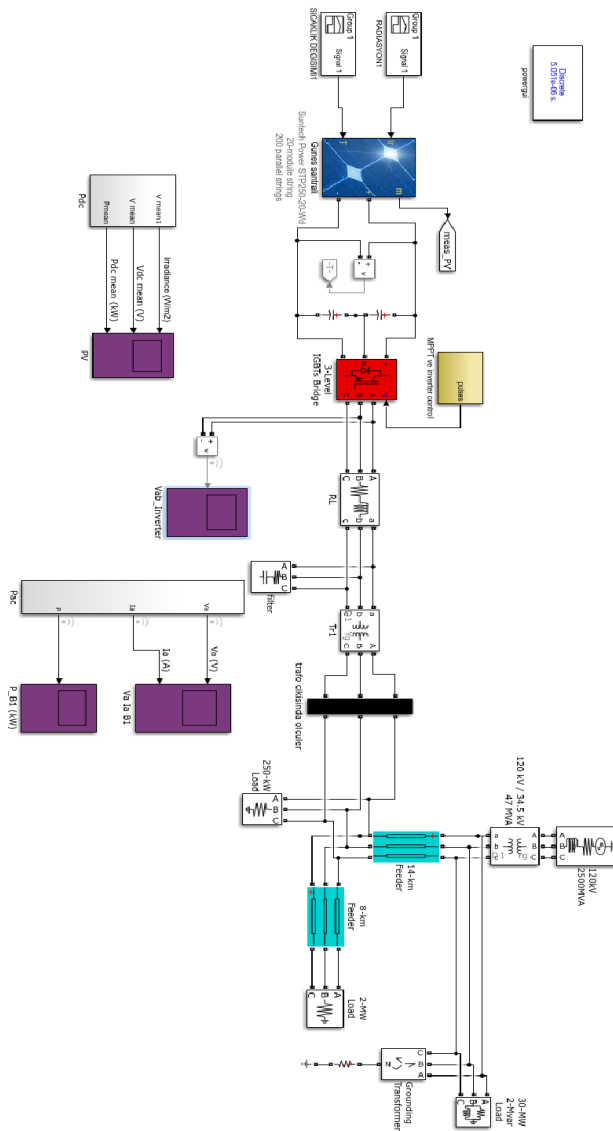
### Güneş Enerjisi Santralının Benzetimi

PV güneş enerjisi santrallerinin ve şebekenin çeşitli işletme koşulları altında şebekeye etkilerinin belirlenmesi amacıyla santral modellemeleri ve benzetimleri yapmak son derece önemli olmaktadır (Du ve ark, 2013; Efe, 2016; Yıldırım 2017). Bu amaçla, Diyarbakır bölgesinde bulunan 1 MW'lık Güneş Enerji Santrali ve şebekeye bağlandığında kullanılan tüm ögelere bağlı kalınarak, MATLAB programında modellenmiş ve benzetimi Şekil 2'deki gibi yapılmıştır. Benzetim sonucunda transformatör çıkışında akım, gerilim ve ürettiği güç değerleri ve bu santral şebekeye bağlandığında ortaya çıkan harmoniklerin seviyeleri elde edilmiştir.

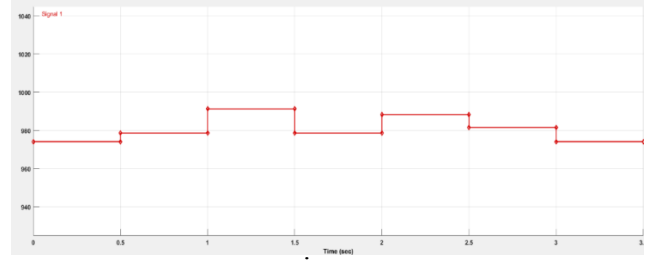
Benzetim sonuçları ile gerçek sonuçları karşılaştırmak amacıyla 2019 yılı Mayıs ayının farklı günlerinde belli saatlerde ölçülen ışıma ve sıcaklık değerleri benzetimde kullanılarak, elde edilen harmoniklerinin seviyeleri, aynı gün ve aynı saatlerde Diyarbakır bölgesinde bulunan 1MW'lık güneş santralinden alınan harmonik seviyeleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla yapılan çalışmalardan, Diyarbakır'da bulunan 1 MW 'lık Güneş santralinde 30 Mayıs 2019 gününe ait verilere göre yapılan benzetim ile

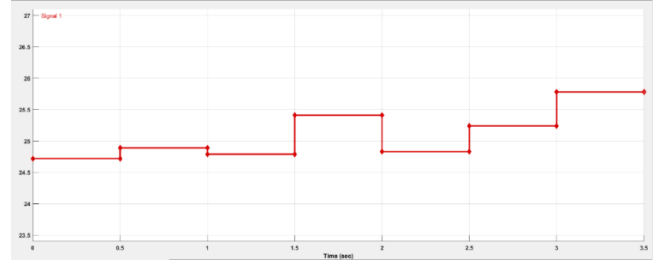
gerçek değerlere ait sonuçlar aşağıda sunulmuştur Santralden her 10 dakikada bir alınan 12:00 ile 13:00 saatleri arasındaki ışıma ve sıcaklık ortalama değerleri Şekil 3 ve Şekil 4’de gösterildiği gibidir. Ele alınan saatlerde ışıma miktarı 880-1020 W/m<sup>2</sup> arasında, sıcaklık 24.7-25.78° arasında değişmektedir. Benzetimde güneş santralinin şebekeye transformatör aracılığıyla bağlandığında, transformatör çıkışındaki akım ve gerilim dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörü elde edilmiş ve Çizelge 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Güneş Santralinin MATLAB Benzetim Modeli.



Şekil 3. Ele Alınan Gün İçin 12:00 – 13:00 Saatleri Arasındaki Işıma Değişimi.



Şekil 4. Ele Alınan Gün İçin 12:00 – 13:00 Saatleri Arasındaki Sıcaklık Değişimi.

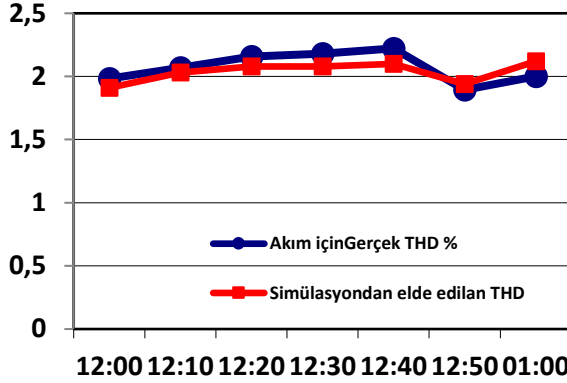
Çizelge 2. Benzetim Sonucunda 12:00 – 13:00 Saatleri Arasında Elde Edilen Akım ve Gerilim THD Faktörü

Zaman	Akım THD (%)	Gerilim THD (%)
12:00	2,13	1,29
12:10	1,86	1,29
12:20	1,77	1,29
12:30	1,83	1,29
12:40	1,79	1,29
12:50	2,00	1,29
1:00	2,12	1,40

Çizelge 2. incelendiğinde ele alınan saat diliminde akım için maksimum THD %2,13, minimum THD ise %1,77 olmuştur. Gerilim için THD'nin ise neredeyse değişmediği (%1,29) sadece saat 13:00'da %1,40'a yükseldiği saptanmıştır.

Şekil 5.'de ele alınan günde 12:00 ve 13:00 saatleri arasında benzetimle elde edilen akım için toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralini gerçek toplam

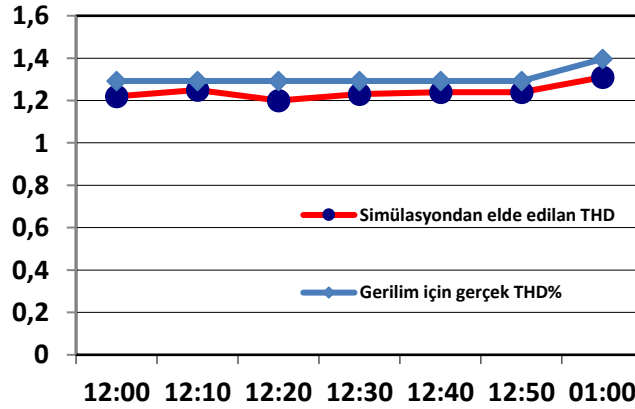
harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırması gösterilmiştir.



12:00 12:10 12:20 12:30 12:40 12:50 01:00

Şekil 5. 1MW'lık Güneş Santralinin Akım için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD.

Şekil 6.'da ise ele alınan gün için 12:00 ve 13:00 saatleri arasında benzetimle elde edilen gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün Diyarbakır'da bulunan 1MW'lık güneş santralinin gerilim için gerçek toplam harmonik bozulma faktörü ile karşılaştırması gösterilmiştir



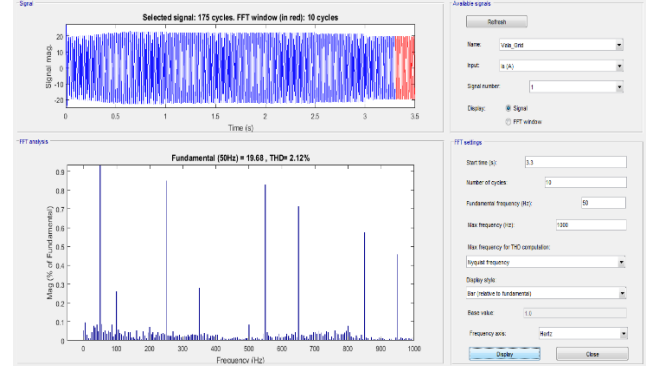
12:00 12:10 12:20 12:30 12:40 12:50 01:00

Şekil 6. 1MW'lık Güneş Santralinin Gerilim için Gerçek THD'si ve Benzetimden Elde Edilen THD

Sonuçların incelenmesinden benzetim ile elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu, akım için maksimum hatanın %5,4; gerilim için maksimum hatanın %7,5 olduğu tespit edilmiştir. Akım için ortalama hata %4,2; gerilim için ortalama hata ise %5,3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar benzetim modelinin oldukça doğru sonuçlar verdiğini

göstermektedir. Böylelikle benzetim modeli araştırmalar için güvenilirlikle kullanılabilir.

Saat 13:00 'te benzetim modelinden elde edilen toplam harmonik bozulma faktörü Şekil 7'de görüldüğü gibi olmuştur.



Şekil 7. FFT ile Saat 13:00'te Alınan Akım Harmonik Seviyeleri

Çizelge 3'de saat 13:00'te akım ve gerilim için harmonik seviyeleri ile hem gerçek ölçümlerden hem de benzetimden elde edilen gerilim ve akım toplam harmonik bozulma faktörü gösterilmiştir. Çizelgedeki sonuçlardan akım için THD'nin benzetim modelinde %5,4'lük hatayla, gerilim için THD'nin ise %6,1'lik hatayla tespit edildiği görülmektedir.

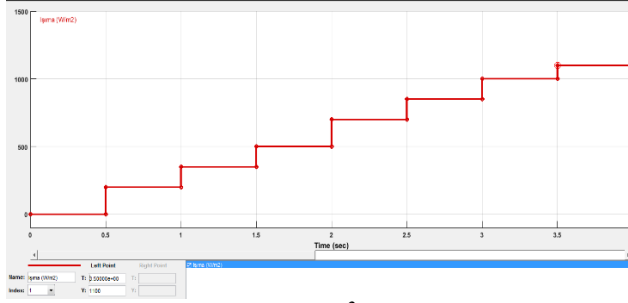
Çizelge 3. Saat 13:00'te Akım ve Gerilimin Harmonik Seviyeleri ile Ölçülen ve Benzetimle Bulunan THD Değerleri

Harmonik derecesi (n)	Benzetimde % In/ I <sub>1</sub>	Gerçekte % In/ I <sub>1</sub>	Benzetimde % Vn/ V <sub>1</sub>	Gerçekte % Vn/ V <sub>1</sub>
1	100	100	100	100
3	0,02	0,55	0,23	0,139
5	0,85	0,88	0,57	0,615
7	0,28	1,5	0,98	1,078
9	0,01	0,02	0,09	0
11	0,83	0,20	0,11	0,099
13	0,71	0,39	0,21	0,238
THD%	2,12	2,001	1,31	1,396

### Harmoniklere Işıma Etkisi

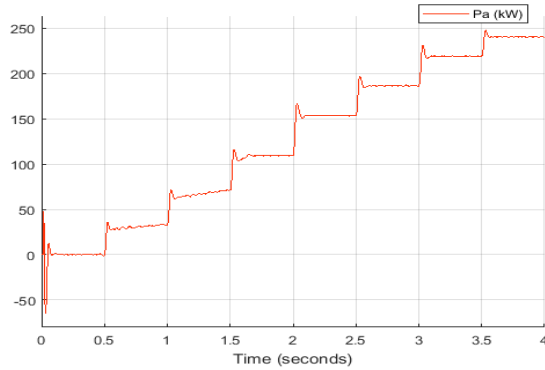
Harmoniklere ışıma etkisinin belirlenmesi için 250 kWp kurulu güce sahip Dicle Üniversitesi Güneş Enerjisi Santrali'nin benzetim modeli kullanılmıştır. Santral benzetiminde sıcaklık

değeri  $25^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutulup ışırma değeri Şekil 8'de gösterildiği gibi her 0,5 saniyede bir değıştirilmiştir.



Şekil 8. Işımanın 0-1100 W/m<sup>2</sup> Arasında Değişimi

Işıırma arttığında santralin sisteme vereceği güç ve dolayısıyla akım değeri de artar ve buna göre sistemin performansı da artar. Şekil 9'da  $25^{\circ}\text{C}$  ortalama sıcaklıkta, etkin ışırma değeri değıştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil 9. incelendiğinde ışırma ve üretilen güç miktarı doğru orantılıdır.



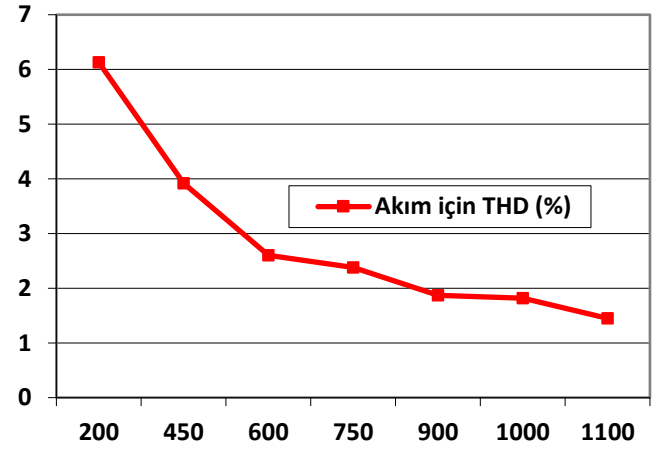
Şekil 9. Işıırma Değişirildiğinde Sistem Performansı

Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 4. ve Şekil 12'de gösterildiği gibi etkin ışırma arttığı zaman akımın toplam harmonik faktörü de azalmış ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline daha fazla yaklaşmıştır. Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıırma değeri  $1000\text{ W/m}^2$ 'ye ulaşığında akım THD'si %1,82'ye düşmektedir. Gerilim THD'lerinin ise ışırma ile nerdeyse değışmediği gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 13.'da

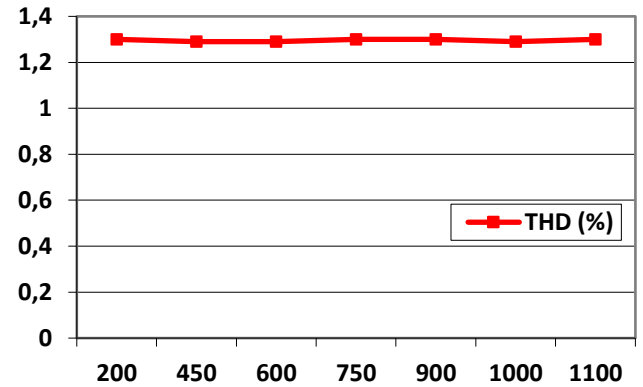
görüldüğu gibi, ışırma değıştirildiğinde gerilimin toplam harmonik bozulma faktörünün fazla etkilenmeyeceği belirlenmiştir.

Çizelge 0. Işıırma-THD İlişkisi

Işıırma W/m <sup>2</sup>	Akım için THD (%)	Gerilim için THD(%)
200	6,16	1,3
450	3,92	1,29
600	2,60	1,29
750	2,38	1,30
900	1,87	1,30
1000	1,82	1,29
1100	1,45	1,30



Şekil 12. Işıırma ile Akım için THD İlişkisi



Şekil 13. Işıırma ile Gerilim için THD İlişkisi

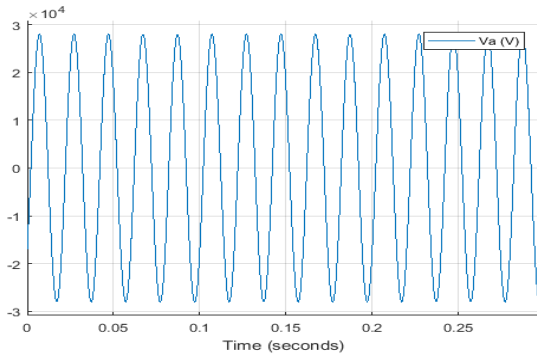
Işıırma değıştirildiğinde transformatör çıkışında FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ile alınan akım

harmoniklerin seviyelerine bakıldığında sonuçlar Çizelge 5’de görüldüğü gibi olmuştur. Genel olarak ışıma arttığında bütün harmonik seviyeleri azalmaya başlamaktadır. Çizelge 5’in incelemesinde görüleceği gibi ışıma  $200 \text{ W/m}^2$  olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışıma  $1000 \text{ W/m}^2$  olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. Harmonikler olduğu görülmüştür.

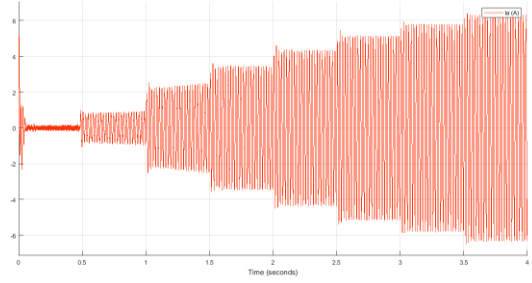
Çizelge 5. FFT ile Akım Harmoniklerinin Seviyeleri

Işıma	Harmonik							
	1.	3.	5.	7.	9.	11.	13.	15.
200	100	0,55	2,10	1,71	0,06	0,65	0,40	0,24
450	100	0,32	0,58	0,64	0,10	0,90	1,14	0,33
600	100	0,03	0,74	0,27	0,05	0,14	0,70	0,18
750	100	0,09	1	0,12	0,6	0,58	0,82	0,04
900	100	0,03	0,69	0,26	0,04	0,28	0,86	0,05
1000	100	0,07	0,65	0,44	0,03	0,44	0,88	0,05
1100	100	0,07	0,41	0,20	0,02	0,35	0,54	0,03

Şekil 14, ve Şekil 15’te sıcaklık  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de sabit olduğunda şebeke tarafında ölçülen akım ve gerilim sinyalleri gösterilmiştir. Gerilim ve akım harmoniklerinin THD’si %5 olarak kabul edilen sınırı aşmadığı için akım ve gerilim dalga şekli sinüs olarak kabul edilir.



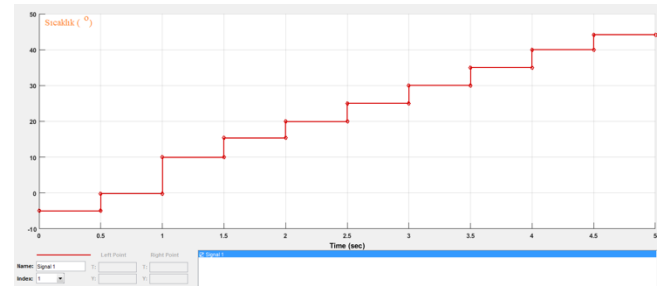
Şekil 14. Işıma Değiştirildiğinde Şebeke Tarafında Ölçülen Gerilim Sinyali



Şekil 15. Işıma Değiştirildiğinde Şebeke Tarafında Ölçülen Akım Sinyali

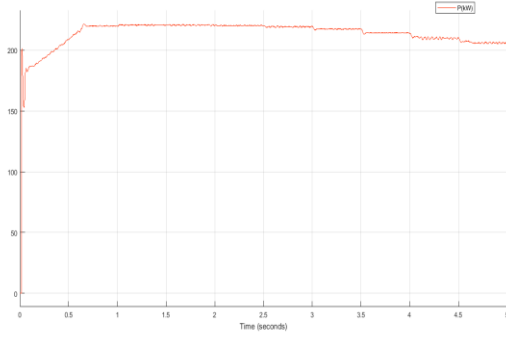
### Harmoniklere Sıcaklık Etkisi

Harmoniklere sıcaklık değişiminin etkisini incelemek üzere santral benzetiminde sabit ışıma değeri  $1000 \text{ W/m}^2$  olarak alınmış sıcaklık değeri  $5 - 45 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında Şekil 16’da gösterildiği gibi her 0,5 saniyede bir değiştirilmiştir.



Şekil 16. Sıcaklığın  $-5$  ile  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  Arasında Değişimi

Şekil 17.’de ortalama ışıma miktarı  $1000 \text{ W/m}^2$ ’de sabit tutularak sıcaklık değeri değiştirildiğinde sistemden elde edilen güç ile şebekeye verilen güç miktarı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansı da azalmıştır.

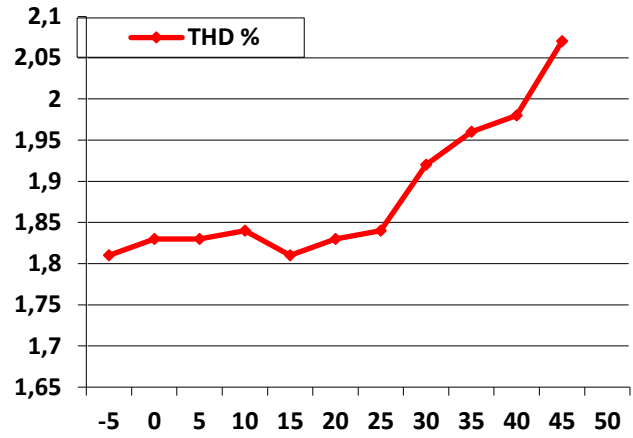


Şekil 17. Sıcaklık Değiştirildiğinde Sistemin Ürettiği Güç

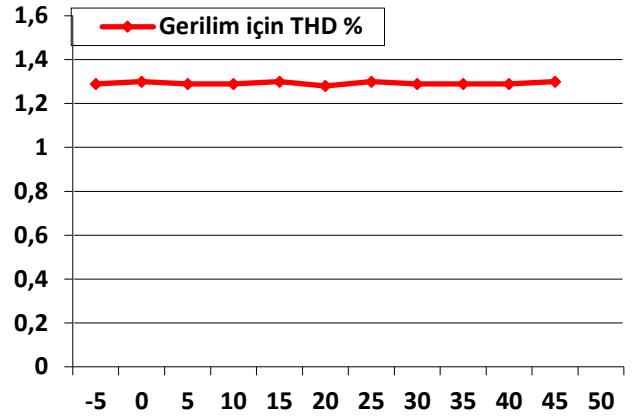
Şebeke tarafında gerilim ve akım dalgalarının toplam harmonik bozulma faktörüne bakıldığında, Çizelge 5 ve Şekil 18’de gösterildiği gibi sıcaklığın 25 °C’ye kadar olan değerlerinde, akımın toplam harmonik faktörü kabul edilen sınırlarda sabit kalmaktadır. 25 °C’den daha büyük sıcaklık değerlerinde ise akımın toplam harmonik bozulma faktörü hafif bir şekilde artmaya başlamıştır. Ayrıca Şekil 19’da gerilim için toplam harmonik bozulma faktörünün sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmediği gösterilmiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde en büyük THD’nin akım için %2,07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 °C ulaştığında Akım THD %1,84 ‘ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 °C olması halinde ise akım için THD %1,96’ya çıkmaktadır. Gerilim THD’lerinin ise sıcaklık ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir.

Çizelge 5. Sıcaklık –THD İlişkisi

Sıcaklık (°)	Akım için THD %	Gerilim için THD%
-5	1,81	1,29
0	1,83	1,30
5	1,83	1,29
10	1,84	1,29
15	1,81	1,3
20	1,83	1,28
25	1,84	1,3
30	1,92	1,29
35	1,96	1,29
40	1,98	1,29
45	2,07	1,3



Şekil 18. Sıcaklık – Akım için THD İlişkisi



Şekil 19. Sıcaklık – Gerilim için THD İlişkisi

### Filtre kullanılmadığında toplam harmonik bozulma faktörü

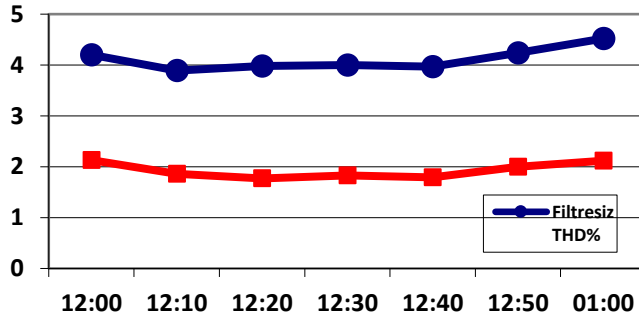
Ele alınan çalışma saatleri olan 12:00 – 13:00 saatleri arasında her 10 dakikada bir ölçülen ışıma ve sıcaklık ortalama değerlerinin (Şekil 3, Şekil 4) benzetim modelinde kullanılmasıyla, filtre kullanılması ve kullanılmaması durumlarında transformatör çıkışında akımın toplam harmonik bozulma faktörü incelenmiştir. Benzetim modelinde filtre olarak RC tipi alçak geçiren bir filtre kullanılmıştır. Filtre parametreleri olarak aktif güç 2 kW ve reaktif güç 100 kVAR olarak seçilmiştir. Şekil 20. ve Çizelge 6’de, 12:00 – 13:00 saatleri arasında filtre kullanıldığında ve filtre olmadığında toplam harmonik bozulma faktörünün nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Çizelge 6’nın incelemesinden filtre uygulanmadığı zaman akım için THD faktörünün değerleri % 3,97

ve %4,52 arasında değiştiği görülmüştür. Filtre kullandığında akım için THD faktörünün değerleri %1,77 ve % 2,13 arasında değişmiştir.

Çizelge 6. Saat 12:00 – 13:00 Arasında Filtreli ve Filtresiz Durumda Akım İçin Toplam Harmonik Bozulma Faktörü

ZAMAN	FİLTRESİZ THD%	FİLTRELİ THD%	DEĞİŞİM %
12:00 – 12:10	4,20	2,13	2,07
12:10 – 12:20	3,89	1,86	2,03
12:20 – 12:30	3,98	1,77	2,21
12:30 – 12:40	4,00	1,83	2,17
12:40 – 12:50	3,97	1,79	2,18
12:50 – 1:00	4,24	2,00	2,24
13:00 – 13:10	4,52	2,12	2,30



Şekil 20. Filtresiz ve Filtreli Sistemde Akım İçin Toplam Harmonik Bozulma Faktörünün Değişimi

Filtre kullanılmadığı zaman toplam harmonik bozulma faktörü kabul edilen %5 sınırına yaklaşmıştır. Buna karşılık filtre kullanıldığında toplam harmonik bozulma faktörü bu sınırdan uzak kalmıştır.

## Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada ilk olarak 1MW'lık fotovoltaik güneş enerji santrali MATLAB/Simulink'de modellenmiş ve benzetimi yapılarak harmonik etkiler elde edilmiştir. Yapılan benzetimden elde edilen sonuçlar, Diyarbakır'da bulunan 1MWp gücüne sahip olan gerçek bir güneş santralinden

alınan harmonik verileriyle karşılaştırıldığında hata oranının akım THD için ortalama %4,2; gerilim THD için ise ortalama %5,3 olduğu görülmüştür. Kabul edilebilir bir hata oranı ile doğruluğu ispatlanan model yardımıyla harmoniklere etki eden parametreler araştırılmıştır.

İlk incelemede Güneş santralinin güç kalitesine ışına etkisi ele alınmıştır. Işıma arttığı zaman sistemin ürettiği güç de artar ve çıkış gücü santralin nominal gücüne yaklaşır. Işıma değeri ideal ışına değerine yaklaşıncaya güç kalitesi de iyileşmekte ve harmonik etkisi daha az olmaktadır. Gerilim için toplam harmonik dağılımı ışına değişimi ile birlikte çok değişmemekle birlikte akım için toplam harmonik dağılımı değişmektedir. Işıma değeri arttıkça santralin gücü anma gücüne yaklaşmakta ve akım için toplam harmonik bozulma faktörü de azalmaktadır. Bu incelemenin sonucunda THD- Işıma değişimi elde edilmiştir. Işıma 200 W/m<sup>2</sup> olduğunda akım için en büyük harmoniklerin 5. ve 7. Harmonikler olduğu görülmektedir. Ayrıca ışına 1000 W/m<sup>2</sup> olduğunda en büyük harmoniklerin 5. ve 13. harmonikler olduğu görülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde en büyük THD'nin akım için %6,16; gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Işıma değeri 1000 W/m<sup>2</sup>'ye ulaştığında akım için THD %1,82'ye düşmektedir. Elde edilen verilere bakıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü ışına miktarı ve ile ters orantılıdır. Işıma miktarı arttığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü azalır ve akımın dalga şekli sinüzoidal şekline yaklaşır.

İkinci incelemede Güneş santralinde görülen harmoniklere sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, en büyük THD'nin akım için %2,07, gerilim için ise %1,3 olduğu görülmektedir. Sıcaklık değeri 25 °C ulaştığında Akım THD %1,84 'ye ulaşmıştır. Sıcaklığın 35 °C olması halinde ise akım için THD %1,96'ya çıkmaktadır. Gerilim THD'lerinin ise sıcaklık ile neredeyse değişmediği gözlenmektedir. Toplam harmonik bozulma faktörü THD yaklaşık 25 °C'ye

kadar %1,83 değeri ile sabit kalmıştır. Ayrıca Sıcaklık 25 °C'den daha büyük değerlere yükseldikçe toplam harmonik bozulma faktörünün değerleri hafif bir şekilde artmaya başlamıştır. 45°C sıcaklıkta THD faktörü %2,07'ye kadar ulaşmıştır. Yapılan incelemede yüksek sıcaklıkta üretilen güç miktarı azalmış ve sistemin performansının da azaldığı görülmüştür. Normal sıcaklık değerlerinde harmonikler sıcaklıktan etkilenmemiştir. Ancak, belli sıcaklık değerinden sonra sıcaklık etkisi akım dalgasında görülmeye başlamıştır. Bu incelemenin Sonucu olarak; benzetimi yapılan bu sistemde Fotovoltaik güç kaynaklarının bağlanmasının harmonikler açısından, standart dışı bir bozucu etkisinin olmadığı söylenebilir.

Son olarak harmonikleri azaltmak amacıyla kullanılan filtrelerin önemini ortaya çıkarmak için dördüncü bir inceleme yapılmıştır. İncelemenin sonucunda filtre kullanmadığımız zaman akım için toplam harmonik bozulma faktörü %4,52'ye kadar artmıştır ve kabul edilen %5 sınırına çok yaklaşmıştır. Ancak filtre kullanıldığında akım için toplam harmonik bozulma faktörü değeri %2 civarındadır ve kabul edilen sınırdan uzak kalmıştır.

Tüm bu incelemeler sonucunda, güneş enerjisi santrallerinde eviricilerin kullanılması ve fotovoltaik panellerin karakteristikleri nedeniyle özellikle akım için toplam harmonik dağılımının ışıma ve sıcaklık değerlerine göre değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Düşük ışıma değerlerinde akım için toplam harmonik değerlerin arttığı ve izin verilen %5'lik sınır değerlere yaklaştığı görülmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinin de akım için toplam harmonik değerlerinin artmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan filtrelerin harmonikleri azaltmada etkin olduğu ve sınır değerlerden uzak kalmak için gerekli olduğu da ortaya çıkmıştır.

## Kaynaklar

- Akdeniz, E. (2006). Yenilenebilir Kaynaklardan Enerji Üretiminin Şebekenin Enerji Kalitesi ve Kararlılığına Etkilerinin İncelenmesi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R. ve Wood, A.R., (1997). Power System Harmonic Analysis, John Wiley & Sons, New Delhi.
- Çelebi, A. ve Çolak, M. (2005). Şebekeye Bağlı Fotovoltaik sistemlerde oluşan harmoniklerin şebekeye etkileri. 3. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Ekim 2005, Mersin, Türkiye.
- Diñer, F. (2011). Türkiye'de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Potansiyeli-Ekonomik Analizi ve AB Ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 14(1).
- Du, Y., & Lu, D. D. C. (2018). Harmonic Distortion Caused by Single-Phase Grid-Connected PV Inverter. In *Power System Harmonics-Analysis, Effects and Mitigation Solutions for Power Quality Improvement*. IntechOpen.
- Du, Y., Lu, D. D. C., James, G., & Cornforth, D. J. (2013). Modeling and analysis of current harmonic distortion from grid connected PV inverters under different operating conditions. *Solar Energy*, 94, 182-194.
- Efe, S . (2016). Power Flow Analysis of a Distribution System Under Fault Conditions. *International Journal of Energy and Smart Grid* , 1 (1) , 22-27 . DOI: 10.23884/IJESG.2016.1.1.03
- Haydaroğlu, C. ve Gümüş, B. (2017). Investigation of the effect of short-term environmental contamination on energy production in photovoltaic panels: Dicle University solar power plant example. *Applied Solar Energy*, 53(1), 31-34.
- Hong, S., & Zuercher-Martinson, M. (2010). Harmonics and Noise in Photovoltaic (PV) Inverter and The Mitigation Strategies. *Solectria Renewables*, White Paper.



[https://www.solectria.com/site/assets/files/1482/solectria\\_harmonics\\_noise\\_pv\\_inverters\\_white\\_paper.pdf](https://www.solectria.com/site/assets/files/1482/solectria_harmonics_noise_pv_inverters_white_paper.pdf)

- Sefa İ. ve Altın, N. (2009). Güneş Pili İle Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler Genel Bir Bakış. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(3).
- Kandemir, Ç., Bayrak, M. (2015), “Fotovoltaik Sistemler Şebekeye Bağlı Olduğunda Oluşan Sorunlar”, VI. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi Bildirileri (EVK).
- Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Moazzenzadeh, M., & Şekerci, H. Güneş Enerji Sistemlerinin Elektrik Şebekesi Güç Kalitesine Harmonik Ve Ara-Harmonik Açısından Etkisinin İncelenmesi. 5.Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi, Ekim 2017, İzmir, Türkiye.
- Rao, P. J. B., & Srikanth, B. (2016). Harmonic Reduction in Grid Connected Solar PV System By Using SVPWM Technique. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(6), 3853-3858.
- Rashid, H. M., (1995), Power Electronics, Circuits, Devices, and Application, Prentice-Hall International, Inc.
- Schlabbach, J., & Gross, A. (2007, May). Harmonic current emission of photovoltaic inverters. 19th Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED 2007), Vienna, Austria.
- Simsek, B., & Bizkevelci E. (2013). Fotovoltaik Güneş Elektrik Santrallerinin Alçak Gerilim Şebekesine Bağlantı Esasları. 3. Ulusal Elektrik Tesisat Kongresi, İzmir. (pp. 1-24).
- TEİAŞ (2019), Elektrik İstatistikleri, Aylık Elektrik İstatistikleri, <https://www.teias.gov.tr/tr/elektrik-istatistikleri>
- Yeşil Ekonomi (2019). Kayseri OSB GES 50 MW güce ulaştı. Haberler. <https://yesilekonomi.com/kayseri-osb-ges-55-mw-kurulu-guce-ulasti/>
- Yıldırım, B . (2017). Investigation with Modal Analysis of Effects Of High PV Penetration on Power System Voltage Stability.

## **Harmonics effects of grid connected solar power plant**

### **Extended Abstract**

*Our standards of living depend on energy, and the increasing demand for clean and cheap one made the renewable energy preferred. Studies and policies developed in energy production have accelerated the use of renewable energy sources, in order to reduce climate change, the issue of safety, energy quality and the connected way in which electricity power generated from renewable energy sources takes great importance. There are many kinds of renewable energy. However, the most important one is the solar energy that can be divided into two sections: the first one is the solar thermal that is used for generally heating, and the second one is the photovoltaic that is used for electrical generation. For electrical generation, we can use a system that consists of photovoltaic panels, power converters such as inverters, etc. In this system we can connect the photovoltaic panels to the grid by inverters that cause harmful harmonics and thus reducing the quality of electrical generation. "Harmonics Effects of Grid Connected Solar Power Plant" takes more and more importance.*

*The use of solar power plant has spread, because of its cost has been reduced, when connecting solar power plants with the grid, the most important problems that we can face are the harmonics caused by the system. Inverter is the main reason for generating harmonics, which has negatively affected on energy quality. In this paper we have studied the effects of harmonics when connecting a solar power plant with the grid.*

*To achieve this study, a solar power center has been simulated by MATLAB / Simulink environment. Harmonic effect was obtained. The results that obtained has been compared with real data taken from the solar power center its capacity 1 MW. Simulation results has been proved its validity through an acceptable error rate,*

*Accordingly the factors affecting the harmonics were studied. The effect of both radiation and temperature on harmonics have been studied. First, study has done when the temperature was constant, we have studied the effect of radiation change on harmonics. Second, study has done when the radiation was constant, we have studied the effect of temperature change on harmonics. After that effect of the filters on harmonics are determined. Finally, suggestions were made to reduce the impact of harmonics.*

**Keywords:** *Photovoltaics, Harmonics, Solar Radiation, Inverter, Renewable Energy, Power Quality, Total Harmonic Distortion.*



# Dalgalı trapez plakalı ısı eşanjörü içindeki nanoakışkanların akış ve ısı transfer karakteristiklerinin incelenmesi

**Elif BÜYÜK ÖĞÜT\***

Kocaeli Üniversitesi Hereke MYO, 41800, Hereke, Kocaeli  
elif.ogut@kocaeli.edu.tr ORCID: 0000-0001-7037-9018

**Seda DİLKİ\*\***

Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli  
seda\_dilki@hotmail.com ORCID: 0000-0001-7983-0952

Geliş: 14.06.2018, Revizyon: 23.10.2018, Kabul Tarihi: 12.11.2018

## Öz

*Bu çalışmada, dalgalı trapez şeklindeki plakalı ısı eşanjöründeki su bazlı nanoakışkanın tam gelişmiş türbülanslı akış ve ısı transferi davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Analizlerde sabit ısı akısı altında ( $6 \text{ kW/m}^2$ ), farklı hacim oranlarında ( $\phi = \%0 - \%4$ ), farklı Reynolds sayılarında (6000 - 20000) ve çapı  $d = 20 \text{ nm}$  olan  $\text{SiO}_2$  nanopartiküllerin etkileri incelenmiştir. Trapez şeklindeki kanalın geometrik parametreleri; trapezin yüksekliği  $e=5 \text{ mm}$ , trapezin vida adım uzunluğu  $Pe = 12 \text{ mm}$ , trapezin genişliği  $w = 3 \text{ mm}$  olarak ele alınmıştır. Yönetici denklemler Ansys Fluent programı ile çözülmüştür.*

*Çalışmada  $\text{SiO}_2$  nanoakışkanının ısı ve akış alanları üzerindeki etkileri incelenmiş olup, ısı transferi nanopartikül hacim oranıyla birlikte artmaktadır. Zorlanmış bir konveksiyonda baz akışkan olarak su kullanılması ile nanoakışkan kullanılması kıyaslandığında, nanoakışkanın 20 nm çapında, % 4 nanopartikül hacimsel oranında, Reynolds sayısı 20000 için ortalama Nusselt sayısında % 18'lik bir artış olmaktadır, ancak basınç düşümü 2.5 katı artmaktadır. Nanoakışkanın ısı transferini iyileştirmesine karşılık basınç düşümündeki artış, kabul edilebilir değer aralığındadır. Nanoakışkanların trapez kanalda kullanımıyla sistemlerin termal performansı artmakta ve daha kompakt ısı eşanjörlerin gelişimine katkı sağlamaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Isı eşanjörü; dalgalı trapez plaka; nanoakışkan; ısı transferi; CFD.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Akışkanın termofiziksel özelliklerini yada akış geometrisini veya sınır koşullarını değiştirerek pasif yöntemlerle konvektif ısı transferi iyileştirilebilir. Bir akışkan vasıtasıyla ısı transferi; ısı eşanjörleri, güneş kolektörleri, buzdolapları, otomobiller, elektronik cihazların soğutulması, elektrik santralleri gibi birçok mühendislik alanlarında önemli bir parametredir. Bir akışkan vasıtasıyla küçük bir sıcaklık gradyanı boyunca büyük miktarda ısı aktarabilme kabiliyeti, enerji dönüştürme verimliliğini artırır, ayrıca ısı eşanjörlerinin tasarımını ve performansını geliştirir. Endüstrinin ihtiyacını karşılamak için yüksek termal iletkenliğe sahip, kompakt ve performanslı eşanjörler geliştirmek için, ileri ısı transfer akışkanlarını geliştirmeye ihtiyaç vardır. Ancak konvektif ısı transfer için kullanılan hava, su, yağ, etilen glikol gibi bazı akışkanlar, çok düşük ısı iletkenliğe sahip olduğundan, günümüz teknolojisinde istenen özellikleri karşılayamamaktadır. Isı transfer akışkanlarının ısı transfer karakteristiklerinin artırılması için kullanılan tekniklerden birisi de akışkan içerisine ısı iletkenlikleri akışkanlarınkine göre daha yüksek olan katı partiküllerin ilave edilmesidir (S.Lee,S-S. Choi, S.U.S., Li, S., Eastman,1999).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar sonucunda içerisinde 100 nanometreden daha küçük katı partiküllerin (metal, metaloksit, karbon nanotüp) söz konusu olduğu yeni bir süspansiyon tipi olan nanoakışkanların keşfiyle ısı transfer akışkanları olarak kullanımı artmıştır. Bu artışın nedeni ise, çok küçük nanopartikül konsantrasyonlarında bile, nanoakışkanların yüksek ısı iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır (Choi, S.U.S.,1995). Nanopartikül olarak genellikle bakır, gümüş, bakır oksit, titanyum oksit ve alüminyum oksit kullanılmaktadır. Nanoakışkanlardaki ısı iletim kabiliyetindeki önemli artışın, katı partiküllerin Brownian hareketine, sıvı katı ortak yüzeyinde söz konusu olan moleküler seviyedeki sıvı tabakalaşması, ısı transfer mekanizmasının

doğası ve nanopartikül yığılmaları gibi faktörlere bağlıdır (Kebinski vd.,2002).

Dalgalı plakaların kullanımı termal performansı ve kompaktlığı uygun bir şekilde artırabilir. Dalgalı bir kanalın kullanılması daha karmaşık bir akış yapısı ile sonuçlanır ve geleneksel bir düz kanalın iki veya üç katına kadar ısı transferini geliştirir. Pekçok araştırmacı çeşitli enine kesit şekilli bir kanaldan geçen geleneksel akışkanın sistem boyutunu azaltmak ve sistem performansını arttırmak için stratejiler geliştirmişlerdir. Dalga açısı ve kanal yüksekliğinin sıcaklık dağılımı ve akış gelişimini önemli ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Dikdörtgen bir kanal ve V şekilli kırık nervürlü ve enine dikdörtgen kanallarda zorlanmış taşınım üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. (Tanda,2007).

Literatürde plakalı ısı eşanjörünün (PHE) su bazlı nanoakışkanların termal performansı ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Balıksırtı tipi plakalı ısı eşanjörünün (PHE) performansı üzerinde % 4 CuO nanoakışkanların etkisi deneysel olarak incelenmiştir (Pantzali vd.,2009)

Elde edilen deneysel veriler ışığında, akış tipinin, fiziksel özelliklerinin yanı sıra ısı eşanjörü teçhizatındaki soğutucu olarak bir nanoakışkanın etkinliğini de etkilediğini doğrulamışlardır. Akışkanın viskozitesi, ısı eşanjörü performansı için çok önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir. Nanopartikül hacmi %0 ila %5 aralığında değişen bir Cu-su nanoakışkanı kullanarak dalgalı ve trapez bir kanaldaki akış ve ısı transferi arttırımının laminer zorlanmış konveksiyonunu sayısal olarak incelenmiştir (Ahmed vd.,2011). Sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısı, dalgalı kanalın genliği arttıkça önemli oranda artmaktadır. Nanopartikül hacimsel oranı arttıkça Nusselt sayısı, sürtünme katsayısında hafif bir artış ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Trapez kanalın en yüksek Nusselt sayısına sahip olduğunu ve bunu sinusoidal, üçgen ve düz kanalın izlediğini tespit etmişlerdir. Bir zigzag dalgalı plakalı ısı eşanjöründe (PHE) akan  $CeO_2$ - su ve  $Al_2O_3$ - su

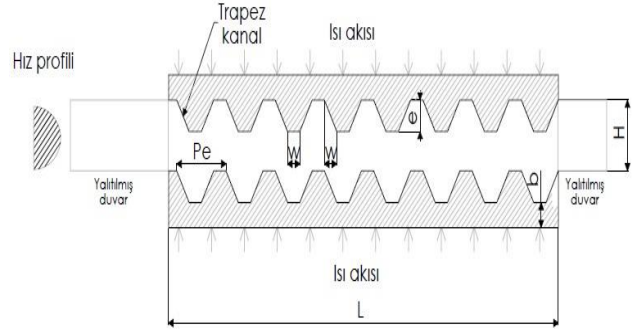
nanoakışkanların akış karakteristiklerini sayısal olarak incelenmiştir (Tiwari vd.,2014). Alternatif soğutucu olarak nanoakışkan kullanılması, soğutma sıvısı olarak suyun aynı olan basınç düşüşü için, daha fazla ısı aktarımı sağladığı için pompalama maliyetini düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Dalgalı trapez şeklindeki plakalı ısı eşanjöründeki,  $Al_2O_3$ ,  $CuO$ ,  $SiO_2$  ve  $ZnO$  su bazlı nanoakışkanın türbülanslı konvektif ısı transferinde, kanal geometrisinin etkileri, ısı ve hidrodinamik akışın davranışları sayısal olarak incelenmiştir (Abed vd.,2015).

Bu çalışmada, sabit kanal genişliği ve uzunluğuna vida adım uzunluğu olan trapez dalgalı kanallarda, nanoakışkan kullanarak türbülanslı ısı transferi ve akışkan akışının sayısal modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve parçacık boyutuna bağlı efektif termal iletkenlik ve viskozitenin korelasyonlarını göstermek için tek fazlı akış modeli kullanılmıştır. Bir trapez dalgalı kanalda türbülanslı zorlanmış konveksiyon için ısıl hidrolük performansını, Nusselt sayısını ve basınç düşüşü ile belirlemek, ısı ve akış alanları üzerinde nanoakışkan etkilerini incelemek bu çalışmanın en önemli hedefleri arasındadır.

## Materyal ve Yöntem

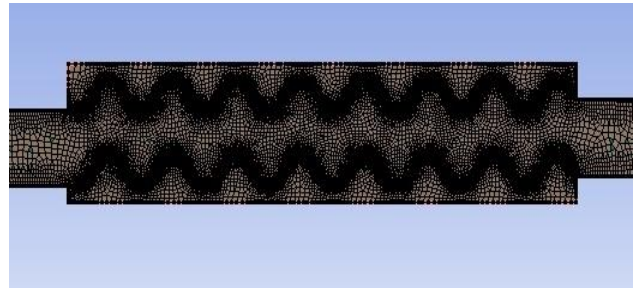
### Fiziksel Model

Bu çalışmada kullanılan trapez kanal plakasının iki boyutlu geometrisi Şekil 1’de gösterilmiştir. Şekil üzerindeki parametreler; kanal yüksekliği  $H = 12,5$  mm, kanal uzunluğu  $L = 95$  mm, trapezin taban yüksekliği  $b = 4$  mm, trapez yüksekliği  $e = 5$  mm, trapez vida adımı  $Pe = 12$  mm, üst trapez kanalın genişliği  $w = Pe/4 = 3$  mm olarak ele alınmıştır. Tam gelişmiş türbülanslı akış için kanalın girişinde 250 mm, çıkışında 100mm yalıtılmış düz kanal mevcuttur.



Şekil 1. Dalgalı trapez kanalın şematik diyagramı

Analizler 20.000, 46.000, 92.000 ve 196.000 olmak üzere farklı eleman sayıları için yapılmıştır. Ortalama Nu sayısı 196.000 eleman sayısında Abed vd.’nin yapmış oldukları çalışma ile uyumluluk göstermektedir. Bu değer üzerindeki eleman sayılarında sonuçlar değişmemektedir. Ağ yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Dalgalı trapez kanalın ağ yapısı

Analizlerde nanopartikül ve akışkanın aynı hızla aktığı ve termodinamik dengede olduğu kabul edilmiştir. Temel akışkan olarak su, nanopartikül olarak  $SiO_2$  kullanılmıştır. Baz akışkan su içerisine  $SiO_2$  nanopartikülleri 20 nm çapında ve %0, %1, %2, %3, %4 olmak üzere farklı hacim oranlarında eklenerek nanoakışkan süspansiyonu elde edilmiştir. Baz akışkan ve nanopartikülün termofiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Termofiziksel özellikler ( $T=20$  °C)

Özellik	Su	$SiO_2$
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	996.5	6320
$C_p$ (J/kgK)	4181	531.8
$k$ (W/mK)	0.613	76.5
$\beta$ (1/K)	0.00021	1.4594
$\mu$ (kg/m.s)	0.001003	-

### Matematiksel Model

Bu çalışmada çözümleme için tek fazlı k-ε standart türbulans modeli kullanılmıştır. Yönetici denklemler aşağıdaki gibidir;

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

Enerji denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

Denklemlerdeki semboller  $\rho$  akışkanın yoğunluğunu,  $\mu$  akışkanın viskozitesini,  $u_i$  eksenel hızı,  $u_j$  düşey yöndeki hızı,  $u'$  dalgalanma hızı,  $\overline{\rho u_i u_j}$  türbülanslı kayma gerilmesi,  $Pr_t$  türbülanslı Prandtl sayısı (0.85) ve  $(\tau_{ij})_{eff}$  sapma gerilimi tensörü olarak ifade edilmektedir.

### Sınır Koşulları

Trapez dalgalı kanalın dışında uygulanan sınır şartlarında, kaymama sınır koşulu ve sabit ısı akısı uygulanmıştır. Düz duvarlar ise ısı olarak yalıtılmıştır. Hız sınır şartı girişte, basınç sınır şartı ise dışta uygulanmaktadır. İki boyutlu akış ve daimi durum için sınır şartları aşağıdaki gibidir;

Duvar için sınır koşulları

$$u = 0, v = 0, q = q_{wall} \quad (4)$$

Giriş sınır koşulları

$$u = u_{in}, v = 0, T = T_{in} \quad (5)$$

Trapez dalgalı kanal boyunca ortalama ısı transfer katsayısı ve  $A_c$  dalgalı trapez kanalın yüzey alanı olmak üzere ortalama ısı transferi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

$$Q_{ave} = h_c A_c (\Delta T_{LMTD}) \quad (6)$$

$$\Delta T_{LMTD} = \left[ \frac{(T_{s,ave} - T_{nf,ave,in}) - (T_{s,ave} - T_{nf,ave,out})}{\ln(T_{s,ave} - T_{nf,ave,in} / T_{s,ave} - T_{nf,ave,out})} \right] \quad (7)$$

Ortalama Nusselt sayısı

$$Nu_{ave} = \frac{h_c H \bar{x}}{k L_{corr}} \quad (8)$$

Giriş hızı

$$u_{in} = \frac{Re \mu}{\rho D_H} \quad (9)$$

Hidrolik çap

$$D_H = \frac{4 A_{cross}}{P} \quad (10)$$

Fanning Sürtünme faktörü

$$C_{fx} = \frac{2 \tau_s}{\rho u_{in}^2} \quad (11)$$

Sürtünme faktörü

$$f = 4 C_{fx} \quad (12)$$

Basınç düşümü

$$\Delta p = f \frac{L \rho u_{in}^2}{2 D_H} \quad (13)$$

Analizlerde kullanılan değerler;  $A_c = 0.278 \text{m}^2$ ,  $H = 0.0125 \text{m}$ ,  $L_{corr} = 0.095 \text{m}$ ,  $\bar{x} = 0.05 \text{m}$ ,  $D_H = 0.02 \text{m}$  olarak ele alınmıştır.

### Nanoakışkanın Termofiziksel Özellikleri

Nanoakışkanın viskozitesi ve ısı iletkenliği için kullanılan iki fazlı karışımlar için önerilmiş modeller aşağıda ifade edilmektedir. Nanopartiküllerin sıvı içerisindeki Brownian hareketini dikkate alan modeller kullanılmaktadır. Bu denklemlerde  $\phi$  katı partiküllerin hacimsel oranları olup,  $nf$ ,  $f$  ve  $s$  alt indisleri ise sırasıyla nanoakışkan, sıvı ve katı partikülleri temsil etmektedir.

Yoğunluk

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (14)$$

Isıl kapasite

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_p \quad (15)$$

Efektif termal iletkenlik

$$k_{eff} = k_{statik} + k_{Brownian} \quad (16)$$

$$k_s = k_f \left[ \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (16.1)$$

$$k_{Brownian} = 5 * 10^4 \beta \phi \rho_f C_{p,f} \sqrt{\frac{\kappa T}{2 \rho_p d_p}} f(T, \phi) \quad (16.2)$$

$$\beta = 1.9526(100\phi)^{-1.4594} \quad (17)$$

Model fonksiyonu

$$f(T, \phi) = (2.8217 \times 10^{-2} \phi + 3.917 \times 10^{-3}) \left( \frac{T}{T_0} \right) + (-3.0669 \times 10^{-2} \phi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (18)$$

Nanoakışkanın viskozitesi

$$\mu_{eff} = \mu_f \left( \frac{1}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} x \phi^{1.03}} \right), df = \left[ \frac{6M}{N\pi\rho_f} \right]^{1/3} \quad (19)$$

Analizlerde kullanılan parametre değerleri;  $T_0 = 293K$ ,  $T = 300K$ , Boltzman sabiti  $\kappa = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $d_p = 2 \times 10^{-8} \text{ (m)}$ ,  $d_f = 3.9 \times 10^{-10} \text{ (m)}$ , baz akışkanın mol ağırlığı  $M = 0.018 \text{ (kg/mol)}$ , Avogadro sayısı  $N = 6.022 \times 10^{23} \text{ (1/mol)}$  olarak ele alınmıştır.

Nanoakışkanın farklı hacim oranlarındaki termofiziksel özellikleri Tablo 2’de, farklı Reynolds sayıları için sınır koşulu giriş hızları Tablo 3’de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Nanoakışkanın termofiziksel özellikleri (T=300K)

$\phi$	$(\rho)_{nf}$	$(C_p)_{nf}$	$(\mu)_{eff}$	$k_{statik}$	$k_{browian}$	$(k)_{eff}$	$f(T, \phi)$	$\beta$
<b>0</b>	996.5	4181	0.001003	0.610	0	0.610	0.000619	0
<b>0.01</b>	1008.73	4105.38	0.001106	0.615	0.023	0.639	0.000602	1.952
<b>0.02</b>	1020.97	4031.57	0.001238	0.621	0.016	0.638	0.000584	0.715
<b>0.03</b>	1033.20	3959.52	0.001409	0.627	0.013	0.640	0.000566	0.392
<b>0.04</b>	1045.44	3889.14	0.001637	0.633	0.011	0.644	0.000548	0.258

**Tablo 3.** Nanoakışkanın giriş hızları

$\phi/Re$	<b>6000</b>	<b>8000</b>	<b>12000</b>	<b>16000</b>	<b>20000</b>
<b>0</b>	0.242	0.322	0.483	0.644	0.805
<b>0.01</b>	0.263	0.350	0.526	0.702	0.877
<b>0.02</b>	0.291	0.388	0.582	0.776	0.969
<b>0.03</b>	0.327	0.436	0.654	0.872	1.091
<b>0.04</b>	0.375	0.501	0.752	1.002	1.253

## Sayısal Çözüm Yöntemi

Bu çalışmada süreklilik, momentum ve enerji denklemleri sonlu hacimler yöntemi esasına dayanan Ansys Fluent paket programı kullanılarak çözülmüştür. Problem iki boyutlu ele alınmıştır. Akışın türbülanslı olduğu kabul edilerek daha kısa sürede çözüme ulaştıran k-ε standart türbülans modeli kullanılmıştır.

Akışın yönetici denklemlerini ayırıklaştırmada ,Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent algoritması ve basınç-hız ikili sistemi kullanılarak,Second order upwind şeması ve üniform grid ağ yapısı kullanılmıştır.

Normalize edilen artık değerler tüm değişkenler için  $10^{-6}$ 'ya ulaştığında çözümlerin yakınsadığı kabul edilmiştir.

Nümerik çalışmadaki kodun doğruluğunu test etmek için, Abed vd.'nin yapmış oldukları çalışma ile mevcut sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Katı hacim oranının  $\phi = 0.04$  olan SiO<sub>2</sub>-su nanoakışkanının farklı Re sayıları ile ortalama Nusselt sayısının mevcut ve referans çalışmanın analiz sonuçlarının kıyaslaması Tablo 4' de sunulmuştur. Mevcut çalışmaya kıyasla referans çalışmada, yönetici denklemleri ayırıklaştırmada Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations algoritması ve 180.000 eleman sayısında, tüm değerler için  $10^{-5}$ 'e ulaştığında çözümlerin yakınsadığı kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uygunluk olduğu görülmüştür.

**Tablo 4.** Farklı Reynolds sayıları için ortalama Nusselt değerinin mevcut ve literatür sonuçlarının karşılaştırması

Re	6000	8000	12000	16000	20000
Mevcut	45.48	56.94	78.90	92.61	110.15
Abed vd.	45.48	56.94	78.90	92.61	110.14

## Bulgular ve Tartışma

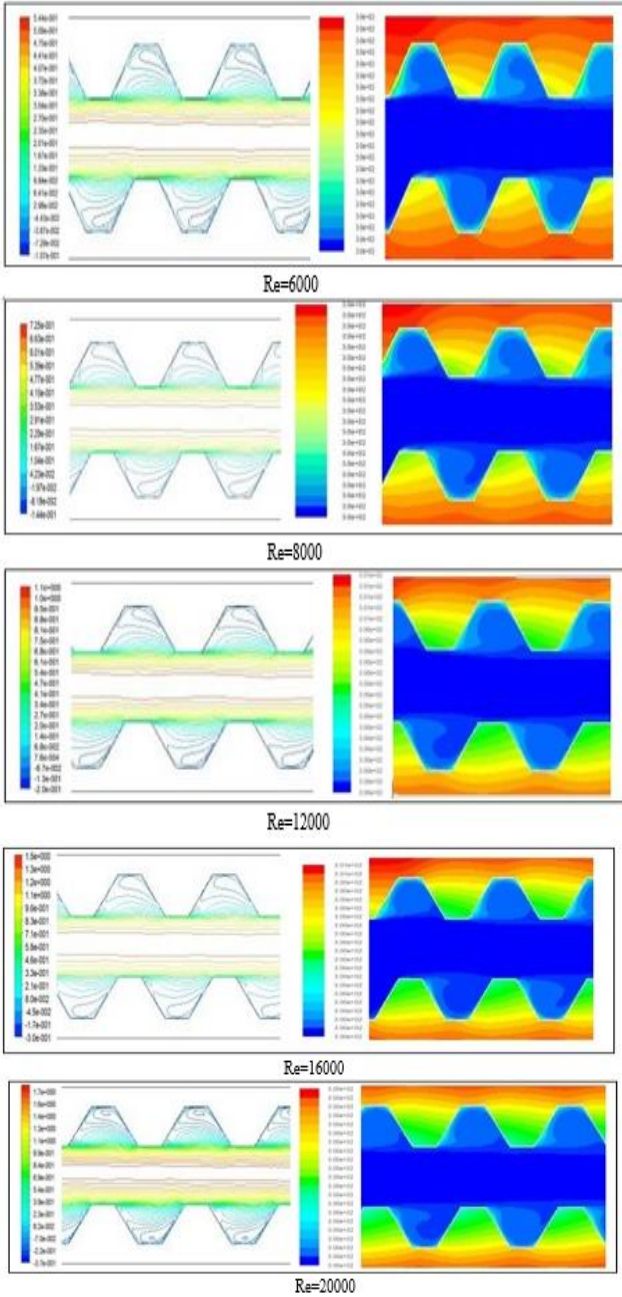
Nümerik analizlerdeki çalışma aralıkları olarak; sabit ısı akısı altında ( $q = 6 \text{ kW/m}^2$ ), farklı hacim oranlarında ( $\phi = \%0 - \%4$ ) ve çapı  $d = 20\text{nm}$  olan SiO<sub>2</sub> nanopartiküllerin etkileri incelenmiştir. Trapez şeklindeki kanalın

geometrik parametreleri; trapezin yüksekliği  $e = 5 \text{ mm}$ , trapezin vida adım uzunluğu  $Pe = 12 \text{ mm}$ , trapezin genişliği  $w = 3\text{mm}$  olarak ele alınmıştır. Isı kaynağının uzunluğu ( $w = L$ ) olarak alınmıştır.

Şekil 3'de farklı Reynolds sayıları ve  $\phi = 0.01$  katı hacim oranlarına sahip nanoakışkanın sol tarafta hız dağılımları grafiği sağ tarafta ise eş sıcaklık eğrileri görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça sirkülasyon çoğalmakta dalgalı kanalın duvarına yakın bölgelerde girdap görünümünde akış hız profilleri görülmektedir. Reynolds sayısı arttıkça hızda artmaktadır. Buna göre hız arttıkça, sirkülasyon bölgeleri dalgalı kanal kavimleri boyunca yanal olarak büyümeye başlar.

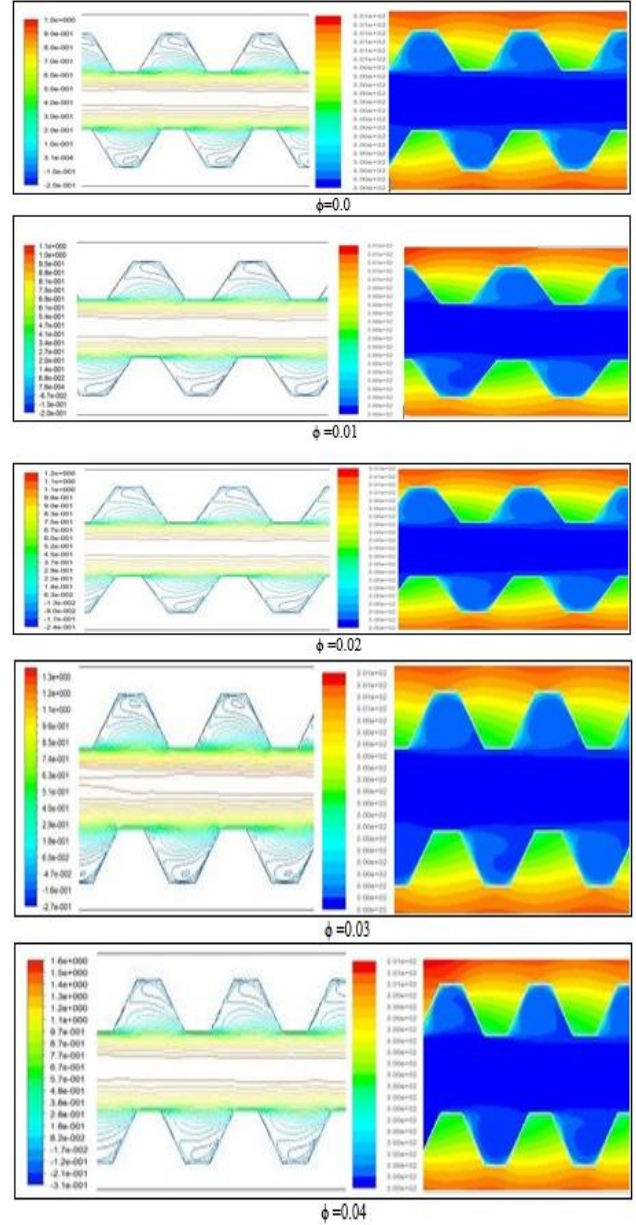
Eşsıcaklık eğrilerine bakıldığında nanoakışkanın, ısı sınır tabakanın yakınındaki sıcak akışkan ile merkez bölgedeki soğuk akışkanın karıştırılmasını desteklemektedir. Sirkülasyon akışının başlaması ve büyümesi, çekirdek bölgedeki akışkanın sınır tabakanın yakınındaki sıcak akışkan ile karıştırılmasını sağlar. İkincil sirkülasyon akışı meydana gelen bir oluk içindeki akış belirlenir. Reynolds sayısının artışıyla ısı sınır tabaka kalınlıkları incelmektedir. Ters akış, dalgalı kanalın üst ve alt duvarlarının yakınındaki olukta meydana gelir. Reynolds sayısı arttıkça, ana akışın zıt yönünde olan duvarların yakınındaki oluktaki hız artar. Ana akışa sekonder akışın yoğunluğu artar ve devridaim bölgesinin boyutu artar. Ardından, sirkülasyon akışı daha da çalkantılı olur. Eş sıcaklık eğrilerinde, dalgalı kanalın duvarlarının yakınındaki sıcak akışkan ile merkezdeki soğuk akışkanın karışması Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Sıcaklık gradyanları, oluklu duvarın yakında oluşturulan sirkülasyon akışı nedeniyle artan Reynolds sayısıyla birlikte artmaktadır.





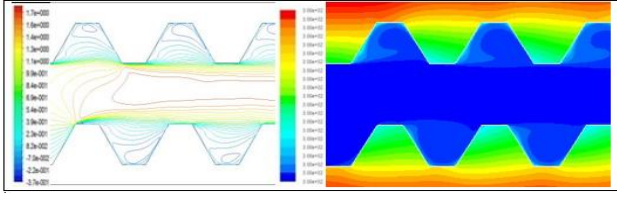
Şekil 3. Farklı Re sayıları ve  $\phi = 0.01$  hacimsel oranındaki a) Hız dağılımları (solda) ve b) eş sıcaklık eğrileri (sağda)

Şekil 4’de farklı hacim oranlarında ve Reynolds sayısı 12000, nanoakışkanın sol tarafta hız dağılımları ve sağ tarafta ise eş sıcaklık eğrileri görülmektedir. Artan katı hacim oranıyla hız değerleri artmaktadır. Baz akışkan suya ilave edilen nanopartiküllerin Brownian hareketiyle arttığı söylenebilir. Eş sıcaklık eğrilerine bakıldığında baz akışkana göre ısı iletkenliği yüksek katı partiküllerin ilavesiyle katı hacim oranının artışıyla sıcaklık gradyanı artmaktadır.



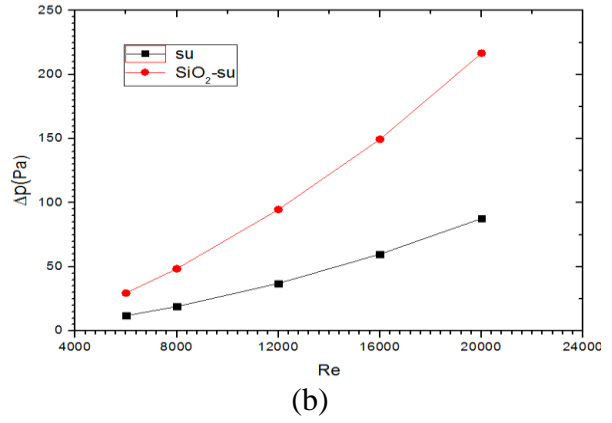
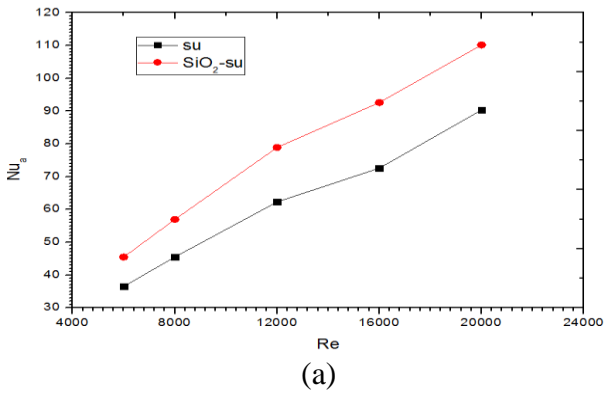
Şekil 4. Farklı hacim oranlarında ve  $Re = 12000$  değerinde a) Hız dağılımları (solda) ve b) eş sıcaklık eğrileri (sağda).

Şekil 5’de Reynolds sayısı 20000, hacim oranı  $\phi = 0.04$  olan nanoakışkanın solda hız dağılımı, sağda eş sıcaklık eğrileri görülmektedir. Hız dağılımı çekirdek bölgede hız artışıyla birlikte üniform olup, sıcaklık etkisi trapez kanal içinde, hacim oranının ve Reynolds sayısının maksimum değerleri alması nedeniyle kanal kenarında daha iyi ısı transferi sağladığı gözlemlenmiştir.



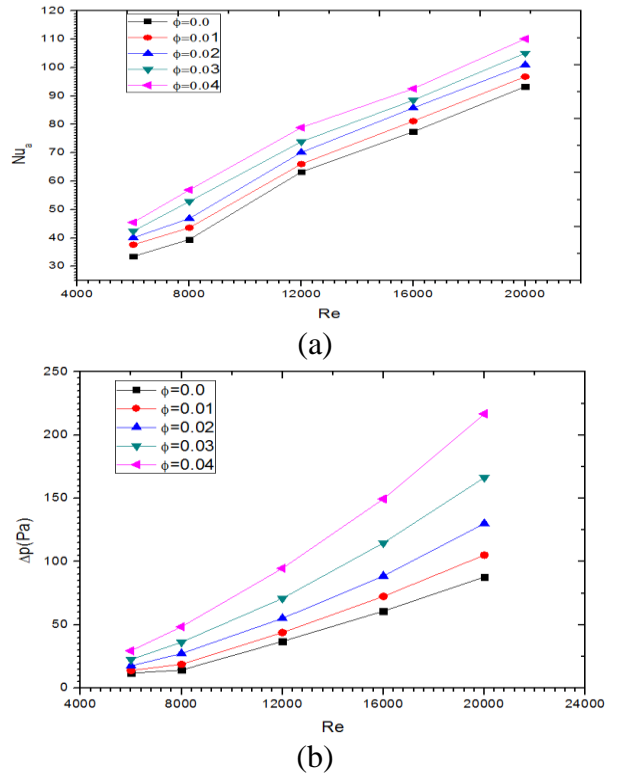
Şekil 5.  $\phi = 0.04$  hacim oranında ve  $Re = 20000$  değerinde a) Hız dağılımları (solda) ve b) eş sıcaklık eğrileri (sağda).

Şekil 6'de baz akışkan su ve  $\phi = 0.04$  katı hacim oranındaki  $SiO_2$ -su nanoakışkanının farklı Reynolds sayılarında, (a) ortalama  $Nu$  sayısı, (b) basınç düşüm değişimleri görülmektedir. Ortalama Nusselt sayısı, baz akışkan su ile, %4 katı hacim oranındaki nanoakışkan kıyaslandığında, nanoakışkanın daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu da ısıl iletkenliği yüksek katı partiküllerin ilave edilmesinden kaynaklanmaktadır. Reynolds sayısı arttıkça artan sirkülasyonla ortalama Nusselt sayısı artmaktadır. Ayrıca Reynolds sayısı arttıkça basınç düşümü de artmaktadır. Nanoakışkanın basınç düşümü saf suya göre daha yüksektir. Akış giriş hızının Reynolds sayısı ile artmasıyla basınç düşümünde artmaktadır.



Şekil 6. Su ve  $\phi = 0.04$  hacimsel orana sahip  $SiO_2$ -su nanoakışkanının farklı  $Re$  sayılarının; (a) ortalama  $Nu$  sayısı ve (b) basınç düşüm değişimleri

Şekil 7'de farklı Reynolds sayıları ve farklı hacim oranlarındaki nanoakışkanın, (a) ortalama  $Nu$  sayısı, (b) basınç düşüm değişimleri görülmektedir. Buna göre artan Reynolds sayısı ve katı hacim oranıyla hem ortalama Nusselt sayısı hem de basınç düşümü artmaktadır.



Şekil 7. Farklı  $Re$  sayıları ve farklı hacim oranlarındaki nanoakışkanın, (a) ortalama  $Nu$  sayısı (b) basınç düşüm değişimleri

## Sonuçlar

Bu çalışmada, iki boyutlu dalgalı trapez şeklindeki plakalı ısı eşanjöründeki SiO<sub>2</sub>- su bazlı nanoakışkanın tam gelişmiş türbülanslı zorlanmış konvektif akış ve ısı transferi davranışları sayısal olarak incelenmiştir. Dalgalı trapez kanala sabit ısı akısı sınır şartı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; baz akışkana nanopartikül eklenmesi ve nanopartikülün hacim oranının artırılması ısı transferini iyileştirmekte, ortalama Nusselt sayısını artırmaktadır. Ancak arzu edilmeyen basınç kaybını artırmaktadır.

Nanoakışkanın hacim oranının % 4, Reynolds sayısının 20000 olduğu durumdaki basınç kaybının artışı baz akışkanın yaklaşık 2.5 katı kadardır. Ortalama Nusselt sayısında ise baz akışkana göre % 18 civarında bir iyileşme olmuştur.

Isı transferinin iyileşmesinde kanal geometrisi de etkin rol oynamaktadır. Kanal duvarlarında girdapların oluşması ısı transferini artırmaktadır. Literatür çalışmaları da incelendiğinde, düz ve silindirik kanallara kıyasla, girinti ve çıkıntılara sahip dalgalı trapez gibi kanallarda ısı transferinin iyileşme oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada nanoakışkan ve dalgalı trapez kanal kullanılması detaylı olarak incelenmiş ve yüksek termal performans katkısında bulunmasından dolayı daha kompakt ve daha düşük maliyetli ısı eşanjörleri tasarımı için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Yalnız nanoakışkan kullanımı ile ısı transfer iyileşmesi sağlanırken, basınç düşümünün artmasıyla, pompa maliyeti yükselir. Ancak bu sonuç nanoakışkan kullanımını sınırlamaz. Isı transfer artışı basınç düşümünün eksik yönüyle performansın genel artışında dengelenir. Bununla birlikte katı hacim oranı arttıkça hem nanoakışkan maliyeti artar hem de süspansiyon içinde çökme meydana gelebilir. Bu nedenle optimum ısı transfer iyileşmesinin sağlandığı değerler tercih edilmelidir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar neticesinde, endüstrinin ihtiyacı olan daha düşük maliyetli, daha hafif ve daha kompakt ısı eşanjörü tasarımları yapılabilir.

## Kaynaklar

- A.M. Abed, M.A. Alghoul, K. Sopian, H.A. Mohammed, Hasan sh. Majdi, Ali Najah Al-Shamani, Design characteristics of corrugated trapezoidal plate heat exchangers using nanofluids, *Chemical Engineering and Processing* **87**, 88 – 103, 2015.
- A.K. Tiwari, P. Ghosh, J. Sarkar, H. Dahiya, J. Parekh, Numerical investigation of heat transfer and fluid flow in plate heat exchanger using nanofluids, *Int. J. Therm. Sci.* **85**, 93 – 103, 2014.
- Choi, S.U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Develop. Appl. Non Newtonian Flows*, 99 – 106, 1995.
- G. Tanda, Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, *Int. J. Heat Mass Transfer* **47**, 229 – 243, 2007.
- H.G. Kwon, S.D. Hwang, H.H. Cho, Flow and heat/mass transfer in a wavy duct with various corrugation angles in two dimensional flow regimes, *Heat Mass Transfer* **45**, 157 – 165, 2008.
- H. Heidary, M. Kermani, Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **37**, 1520 – 1527, 2010.
- H. Heidary, M. Kermani, Heat transfer enhancement in a channel with block (s) effect and utilizing nano-fluid, *Int. J. Therm. Sci.* **57**, 163 – 171, 2012.
- H. Mohammed, A.M. Abed, M.Wahid, The effects of geometrical parameters of a corrugated channel with in out-of-phase arrangement, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **40**, 47 – 57, 2013.
- Kebllinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A. , Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles (nanofluids), *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**, 855 – 863, 2002.
- M. Ahmed, N. Shuaib, M. Yusoff, A. Al-Falahi, Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **38**, 1368 – 1375, 2011.
- M. Pantzali, A. Mouza, S. Paras, Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE), *Chem. Eng. Sci.* **64**, 3290 – 3300, 2009.
- P.Naphon, Laminar convective heat transfer and pressure drop in the corrugated channels, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **34**, 62 – 71, 2007.
- P.Naphon, Effect of wavy plate geometry configurations on the temperature and flow

distributions, *Int. Commun. Heat Mass Transfer* **36**, 942 – 946, 2009.

S.Lee,S-S. Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A.,  
Measuring thermal conductivity of fluids  
containing oxide nanoparticles, *ASME J. Heat  
Transfer* **121**, 280 – 289, 1999.

Y. Islamoglu, C. Parmaksizoglu, The effect of  
channel height on the enhanced heat transfer  
characteristics in a corrugated heat exchanger  
channel, *Appl. Therm. Eng.* **23**, 979 - 987, 2003.

## Investigation of flow and heat transfer characteristics of corrugated trapezoidal plate heat exchangers using nanofluids

### Extended abstract

*In this study, fully developed turbulent flow and heat transfer behaviors of the water based nanofluid in the corrugated trapezoidal plate heat exchanger have been numerically investigated. The effects of SiO<sub>2</sub> nanoparticles with different volume fractions ( $\phi = 0\% - 4\%$ ), different Reynolds numbers (6000-20000) and diameter 20nm were investigated under constant heat flux ( $6 \text{ kW} / \text{m}^2$ ) in the analyzes. Geometrical parameters of the corrugated trapezoidal channel, trapezoidal height  $e = 5\text{mm}$ , trapezoidal pitch length  $Pe = 12\text{mm}$ , width of the top trapezoidal channel  $w = 3\text{mm}$ . The problem is assumed to be two dimensional. To ensure a fully-developed flow, the length of each adiabatic flat wall section before and after the corrugated section is set to be 250 and 100mm, respectively.*

*Executive equations have been solved with Ansys Fluent programme. The  $k-\epsilon$  standard turbulence model, which delivers the solution in a shorter time, is used. Second order upwind scheme and uniform grid structure are used to discretize executive equations, using Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent algorithm and pressure-velocity binary system. Solutions are assumed to converge when normalized residual values reach  $10^{-6}$  for all variables. In order to test the correctness of the code in the numerical study, the results obtained are compared with Abed et al. and it has been seen that there is a good fit between the results.*

*The effects on heat and flow fields have been investigated heat transfer increases together with the nanoparticle volume concentration.*

*Adding nanoparticles to the base fluid and the increase in the coefficient of thermal conductivity due to the volume fraction of the nanoparticle improves heat transfer and increases the average Nusselt number but the*

*pressure loss also increases. Because Reynolds number and increased viscosity due to the volume fraction increases velocity.*

*In this study, velocity distributions, isotherm contours, average Nusselt numbers and pressure loss are obtained at different Reynolds numbers and different volume fractions. When compared results to the base fluid, nanofluid increases of 18 % in the average Nusselt number is observed for the nanoparticle at 4% nanoparticle volume fraction and Reynolds number 20000. The increase in pressure loss is about 2.5 times that of the base fluid.*

*The geometry of channel that provides a turbulence flow plays an effective role in improving heat transfer. The formation of vortices in the channel walls increases heat transfer. When literature studies are examined, it is observed that the recovery rates of heat transfer in channels such as corrugated trapezoidal with recesses and protrusions are higher than those of flat and cylindrical channels.*

*The use of nanofluid and corrugated trapezoidal channels has resulted in being able to design compact and more cost-efficient heat exchangers due to its contribution to high thermal performance. The pump cost is increased by increasing the pressure drop while heat transfer recovery is achieved by using only nanofluid. However, this result does not limit the use of nanofluids. The increase in heat transfer is compensated for in the overall increase in performance in the missing direction of pressure drop. As the volume fraction increases, both nano activity costs increase and precipitation may occur in the suspension. For this reason, optimum heat transfer recovery values should be preferred.*

*This study conclude that the use of nanofluid instead of traditional heat transfer fluid enhances heat transfer. Therefore in need of the industry, having a high thermal performance, it contributes to a compact and more cost-efficient design of plate heat exchanger.*

**Keywords:** Heat exchanger; Corrugated trapezoidal plate; Nanofluid; Heat transfer; CFD.



## Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi

**Mustafa ALBAYRAK\***

*İnönü Üniversitesi, Malatya Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Malatya*  
[mustafaalbayrak@inonu.edu.tr](mailto:mustafaalbayrak@inonu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-2913-6652, Tel: (422) 211 86 75 (162)

**Mete Onur KAMAN**

*Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ*  
[mkaman@firat.edu.tr](mailto:mkaman@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-0178-6079, Tel: (424) 237 00 00 (5315)

Geliş: 30.10.2018, Revizyon: 17.12.2018, Kabul Tarihi: 15.02.2019

### Öz

*Bu çalışmada, St37 çelik ve AA7075-T651 alüminyum numunesi üzerine Charpy darbe testi uygulayarak malzemelerin darbe absorbe enerjileri incelenmiştir. Deliksiz ve ortasında farklı delik geometrilerine sahip delikli numune modelleri kullanılmıştır. Deneysel prosedürde, numuneler 50x20x2 mm boyutlarında hazırlandıktan sonra dairesel delik etkisini inceleyebilmek için numune merkezine 9 mm çapında dairesel delik açılmıştır. Deneyler universal Charpy darbe test cihazında, dairesel delikli ve deliksiz St37 çelik numuneler için üçer kez tekrar edilmiştir. Test cihazının vurucu kütlesi 6.784 kg olup kapasitesi 49.05 J dir. Sayısal çalışmada, ANSYS yazılımı ön işlemci olarak, LS-DYNA ise çözücü olarak kullanılmıştır. St37 çelik ve AA7075-T651 alüminyum malzeme numunesi için, çözücüde Mat 15(Johson-Cook) malzeme modeli tercih edilmiştir. Vurucu ve mesnet modeli için Mat 20 (Rigid) malzeme modeli seçilmiştir.*

*Enerji sönümleme mekanizması hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz edilerek, delikli ve deliksiz numuneler için karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere göre St37 çelik numuneler için deliksiz numunelerin darbe dirençleri, merkezinde 9 mm çapında dairesel delik bulunan numunelerle kıyaslandığında önemli bir üstünlüğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Numune kesitinde sürekliliğin bozulmasıyla birlikte darbe sönümleme enerjisinin deneysel olarak % 46.53 oranında düştüğü tespit edilmiştir. Numunelerin deneysel çalışmalar sonrasında ölçülen darbe absorbe enerjileri ile sonlu elemanlar metodu kullanılarak elde edilen sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak grafikler halinde sunulmuştur. Çalışma sonucunda, sayısal ve deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlar arasındaki maksimum fark tüm numuneler için %4.62 olarak elde edilmiştir. Kullanılan sayısal darbe test metodunun deneylere gerek kalmadan karmaşık ve farklı geometrilere sahip numuneler için uygulanabilirliği ortaya çıkmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** St37; LS-DYNA; Charpy Darbe Testi; Johnson-Cook; ANSYS;

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Malzemelerin darbe davranışı ve kırılma tokluğu tasarım için oldukça önemli parametrelerdir. Bu verilerin elde edilmesinde uygulanacak deneysel veriler ışığında sayısal darbe analizlerinin gerçekleştirilmesi tasarımcılar için oldukça kolaylık sağlayacaktır. Darbe deneylerinin genel amacı, malzemelerde gevrek kırılmaya neden olacak gerilme birikimini darbe esnasında malzeme tabanına yapay olarak uygulayıp, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarının doğru tayin edilmesi gerekir. Elde edilen bu değer o malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır. Endüstriyel uygulamalarda malzemelerin ortam sıcaklığına ve maruz kaldığı yük türüne göre hasara uğradıkları görülmektedir. Mühendisler malzeme seçimlerinde, kullanacakları malzemelerin çalışma şartlarında meydana gelebilecek sünek ya da gevrek kırılmalara karşı ne kadarlık bir enerji sönümleyebileceği hakkında bilgi sahibi olmak isterler. Bu amaçla, malzemelerin dinamik yükler altında dayanabilecekleri maksimum kırılma enerjilerini belirlemek veya ani darbe anında absorbe edebileceği enerji miktarını tespit ederek malzemenin sünek veya gevrek davranışı hakkında bilgi elde etmek için *Charpy* darbe deneyi yapılır.

Ali ve diğerleri (2011), alüminyum 6061 ve düşük karbonlu 1050 çeliği üzerine yaptıkları *Charpy* darbe deneyinde, numunelerin malzeme özelliklerine bağlı olarak darbe enerjisi sönümleme miktarlarını kıyaslamışlardır. Ghaith ve Fadi (2010), *AISI 4140* çelik alaşımı numuneler kullanarak farklı test sıcaklıklarının malzeme darbe enerjileri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca yapmış oldukları sonlu elemanlar modelinde, sonlu eleman sıklığının deneysel ve sayısal çalışma arasındaki hata oranına etkisini analiz etmişlerdir. Serizawa ve diğerleri (2001), *Charpy* darbe deneyi sonrasında farklı çentik tiplerinin plastik şekil değiştirme miktarları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Jeong ve diğerleri (2008), çentiksiz numunelerin

darbe dayanımlarını değerlendirmek amacıyla sonlu elemanlar analizi üzerinde çalışmışlardır. Ozturk (2010), vurucu tipi, ölçüleri, numune kalınlığı ve malzeme özelliği gibi parametrelerin darbe enerjileri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Kumar ve diğerleri (2012), farklı vurucu hızlarının numuneler üzerindeki dinamik etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca statik olarak ta asal gerilmelerin değişimlerini analiz etmişlerdir. Ghaith ve diğerleri (2013), *AISI 4140* çeliği ve Alüminyum *A6061*'den üretilmiş numuneler üzerinde *Charpy* darbe deneyi gerçekleştirmişlerdir. Sonuçta numunelerin absorbe enerjilerini ve maksimum şekil değiştirme miktarlarını kıyaslamışlardır. Altenhof ve diğerleri (2004), çentiksiz test numunelerini *ASTM - E23* standartlarında imal ettikten sonra *Charpy* darbe test cihazında deneylere tabi tutmuşlardır. Deneyler sonucunda: vurucunun çarpma hızının maksimum reaksiyon yükü, toplam enerji ve absorbe enerjisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kılıçaslan ve diğerleri (2012), düşük hızlarda darbeye maruz kalan *1050 H14* ve *3003* alüminyum alaşımından imal edilen plakalarda oluşan hasarı, düşen ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilen darbe deneyleriyle belirlemişlerdir. Madhusudhan ve diğerleri (2018), V çentikli zırh çelikleri üzerine farklı hızlarda vurucu düşürerek numunelerin darbe enerjilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında plastik deformasyon için *Johnson-Cook* hasar kriterini uygulamış ve çentik etrafındaki gerilme dağılımlarını incelenmişlerdir. Majzoobi ve diğerleri (2018), alüminyum ve titanyum tabakaların farklı dizilişleri ile elde edilen fiber metal numuneler üzerinde yüksek hızlı darbe deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada numunelerin absorbe enerjilerini belirleyerek balistik davranışlarını incelemişlerdir. Puech ve diğerleri (2018), kısa kevlar takviyeli bio kompozitlerin darbe davranışlarını deneysel ve sayısal olarak karşılaştırmışlardır. Farklı darbe enerjileri altındaki numunelerin zamana bağlı temas kuvveti değişimlerini incelemişlerdir. Trajkovski ve diğerleri (2015), *PROTAC 500* zırh çeliğine ait *Johson-cook* malzeme parametrelerini ve hasar kriterlerini belirlemişlerdir. Sonrasında numuneleri *Charpy*

darbe test cihazında testlerden geçirerek, malzemeye ait bu özelliklerin geçerliliğini sayısal sonuçlarla karşılaştırılarak kontrol etmişlerdir. Buzyurkin ve diğerleri (2015), titanyum alaşımlarından üretilmiş bir uçak motorunun fan kasasına yüksek hızlı darbe testi uygulamışlardır. Dinamik yüklemeler altında malzeme davranışlarını incelemek için *Johson-cook* malzeme modelini ve hasar kriterini kullanmışlardır. Liu ve diğerleri (2017), fiber metal tabaka ve alüminyum köpükten oluşan, geliştirilmiş yeni nesil sandviçler üzerinde düşük hızlı darbe çalışarak köpük kalınlıklarına bağlı olarak darbe sönümleme enerjilerini karşılaştırmışlardır. Santiago ve diğerleri (2018), polipropilenden üretilmiş takviye elemanına sahip yeni nesil termoplastik fiber metal tabakalı kompozitlerin darbe davranışları üzerinde çalışmışlar. Düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe testleri sonucunda numunelerin balistik sınırlarını ve darbe absorbe enerjilerini belirlemişlerdir. Wang ve diğerleri (2016), farklı çekirdek malzemelerine sahip sandviç panellerin orta hızlı darbe altındaki dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çekirdek malzemelerine göre sandviç panellerin temas kuvvetlerini ve enerji absorbe özelliklerini karşılaştırmışlardır. Ansari ve Chakrabarti (2016), kevlar takviyeli kompozitler üzerinde farklı ağırlıklara sahip, deforme olabilen vurucular kullanarak düşük ve yüksek hızlı darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Vurucu hızlarına bağlı olarak hasar ilerlemesi üzerinde çalışmışlardır. Zmindak ve diğerleri (2016), alüminyum, çelik ve kompozit levhalar üzerine yüksek hızlı darbe testi gerçekleştirmişlerdir. Kompozit için *Hashin* hasar kriterini uygularken, alüminyum ve çelik için *Johson-cook* malzeme modeli ve hasar kriterini tanımlayarak levhalar üzerindeki *von Mises* gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Kim ve diğerleri (2015), tungsten ağır alaşımı üzerine *Charpy* darbe testi gerçekleştirerek, darbe absorbe enerjilerini ve *Wierzbicki-Xue* hasar modeline ait katsayıları tespit etmişlerdir.

Araştırmalarda genellikle darbe testi üzerinde malzeme etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca kenar çentik geometrisinin

incelendiği çalışmalar da mevcuttur (Madhusudhan ve diğerleri (2018), Srizawa ve diğerleri (2001)). Literatürden farklı olarak bu çalışmada ise *St37* çelik ve *AA7075-T651* alüminyum malzemesinden yapılmış ortasında farklı delik geometrilerine sahip numuneler üzerinde *Charpy* darbe testleri sayısal olarak gerçekleştirilerek numunelerin darbe dayanımları belirlenmiştir. Çalışmanın amacı numunelerin delik geometrilerinin darbe enerji sönümlemesi üzerine etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla başlangıçta deliksiz ve dairesel delikli numunelerin deneysel testleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler sayısal sonuçlarla doğrulanmıştır. Sonrasında ise elde edilen sayısal veriler ışığında farklı delik geometrilerine sahip numunelerin darbe absorbe enerjileri sayısal olarak hesaplanmıştır. Ayrıca deliksiz ve dairesel delikli numunelerde, vurucunun numuneye teması ile birlikte ortaya çıkan *von Mises* gerilme dağılımları ve numunenin vurucu doğrultusundaki zamana bağlı şekil değişim miktarları grafikler halinde sunulmuştur. Sayısal analizde, numune ve mesnetler *LS-DYNA* paket programında üç boyutlu olarak modellenmiş olup, vurucu modeli *SolidWorks* programından aktarılmıştır. Gerekli sınır şartları ve temas parametreleri tanımlandıktan sonra analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak grafikler halinde verilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Deneysel Çalışma

Darbe testi *St37* çeliği üzerinde uygulanmış olup ortasında dairesel delik bulunan ve deliksiz numuneler için gerçekleştirilmiştir *St37* çeliğine ait numuneler 50x20x2 mm ölçülerinde olacak şekilde üçer adet hazırlanmıştır (Şekil 1). Ortasında dairesel delik bulunan numuneler için universal matkap tezgâhları kullanılarak delik çapı 9 mm olacak şekilde dairesel delikler açılmıştır (Şekil 2). *Charpy* darbe testleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan 49.05 J kapasiteli universal *Veb Werkstoffprüfmaschinen Leipzig* marka *Charpy* test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Darbe testleri gerçekleştirilirken, numuneler mesnet yuvasına yerleştirildikten sonra sarkaç kola bağlı vurucunun serbest bırakılmadan önceki yüksekliği ile çarpma sonrası ulaştığı yükseklik arasındaki potansiyel enerji farkı, numuneye ait darbe sönümlenme enerjisi olarak cihaz ölçüm kadranından okunmuştur.



1 nolu numune: N1  
Boyutlar 50x20x2 mm

2 nolu numune: N2  
Boyutlar 50x20x2 mm

3 nolu numune: N3  
Boyutlar 50x20x2 mm

Şekil 1. St37 çeliğinden üretilmiş deliksiz numuneler.



1 nolu numune: DN1  
Boyutlar 50x20x2 mm  
 $d = 9$  mm

2 nolu numune: DN2  
Boyutlar 50x20x2 mm  
 $d = 9$  mm

3 nolu numune: DN3  
Boyutlar 50x20x2 mm  
 $d = 9$  mm

Şekil 2. St37 çeliğinden üretilmiş delikli numuneler.

## Sayısal Çalışma

### Sonlu Elemanlar Metodu

Çalışmada *LS-DYNA* yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. *SolidWorks* programında oluşturulan vurucu geometrisi *LS-DYNA* programına aktarılmıştır. Eleman tipi olarak *Solid164* seçilmiştir. Numune modeli olarak, deliksiz numunelerin yanı sıra ortasında üçgen, dörtgen, beşgen, altıgen ve dairesel delik bulunan modeller kullanılarak delik geometrisinin darbe dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Numunelere ait farklı delik geometrileri Şekil 4'te verilmiştir. Daha hassas sonuçlar elde etmek için geometriyi uygun sonlu elemanlar ağ yapısına bölerek optimum ağ sıklığı elde edilmiştir. Çalışmada deliksiz numuneler için 39.334 düğüm, dairesel delikli numuneler

için ise 57.626 düğüm kullanılmıştır. Dairesel delikli numune için sonlu elemanlar ağ yapısı Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 3. Universal Charpy darbe test cihazı

Bu çalışmada malzeme modeli olarak *Johnson-Cook* malzeme modeli, hasar kriteri olarak ta *Johnson-Cook* hasar kriteri kullanılmıştır (Banerjee ve diğerleri, 2015). *Johnson-Cook* malzeme modeli izotropik malzemeler için kullanılır. *St37* çelik ve *AA7075-T651* alüminyum malzeme numunesi için, çözücüde *Mat 15 (Johnson-Cook)* malzeme modeli tercih edilmiştir. Vurucu ve mesnet modeli için *Mat 20 (Rigid)* malzeme modeli seçilmiştir. Deneysel test cihazının vurucu kütlesi 6.78 kg'dır. Sayısal darbe testlerinde çözüm zamanı önemli bir parametredir. Numuneye göre oldukça büyük, bu kütlede bir vurucu modelini sayısal olarak yapmak model hacmini ve eleman sayısını dolayısıyla da çözüm zamanını artıracaktır. Bu nedenle aynı vurucu kütlesini elde edecek şekilde yoğunluk artırılıp, numune hacmi küçültülmüştür. Dolayısıyla da çözüm zamanı azaltılmıştır. Vurucu modellemesi yapılırken vurucunun temas yüzeyi, test cihazındaki vurucu temas yüzeyi ile aynı boyutlarda tasarlanmıştır. Temas yüzeyi boyutları değişmediği için kontak gerilmeleri değişmeyecektir. Vurucu ve mesnet malzemelerine ait mekanik özellikler Tablo 1'de

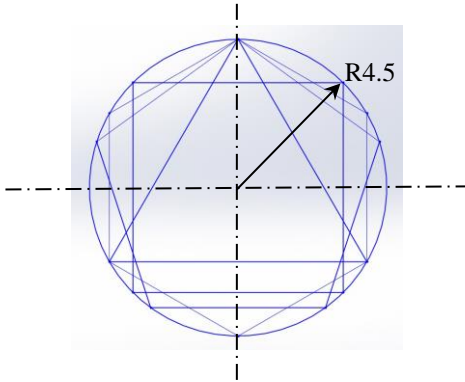
verilmiştir. Alüminyum AA7075-T651 ve St37 malzeme modeline ve hasar kriterlerine ait özellikler ise Tablo 2- 5'te sunulmuştur.

### Johnson-Cook Plastik Malzeme Modeli

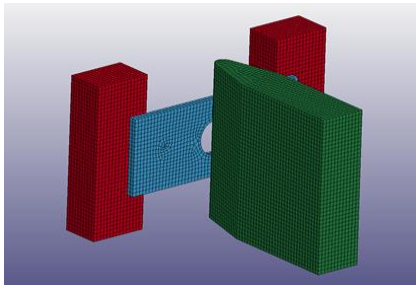
Bu izotropik malzeme modeli akma sınırının altındaki gerilmelerde *Hooke* kanununa uygun olarak lineer elastik davranış göstermektedir (Ceylan ve İlker, 2008). Akma sınırının üzerine çıkan gerilme durumlarında ise plastik davranış göstermektedir. Gerilme ve birim uzama arasındaki ilişki (1) eşitliğinde verilmektedir (Ceylan ve İlker, 2008).

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_0} \right] [1 - [T^*]^m] \quad (1)$$

Burada;  $\sigma$  akma mukavemeti,  $A$  akma gerilmesi,  $B$  pekleşme modülü,  $\varepsilon$  plastik birim uzama,  $n$  pekleşme üs katsayısı,  $C$  şekil değiştirme sabiti,  $\dot{\varepsilon}$  deformasyon hızı,  $\varepsilon_0$  referans deformasyon hızı,  $m$  sıcaklık üs katsayısı ve  $T^*$  Kelvin cinsinden erime sıcaklığıdır.



Şekil 4. Numunelere ait farklı delik geometrileri



Şekil 5. Vurucu, numune ve mesnetlere ait sonlu elemanlar modeli.

Tablo 1. Vurucu ve mesnet malzemelerine ait mekanik özellikler.

Özellikler	Sembol	Vurucu	Mesnet
Elastisite Modülü (GPa)	$E$	210	210
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	351803.72	7850
Poisson oranı	$\nu$	0.3	0.3

Tablo 2. St37 malzemesine ait mekanik özellikler. (Ozturk, G., 2010).

Özellikler	Sembol	Vurucu
Elastisite Modülü (GPa)	$E$	210
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	7850
Poisson oranı	$\nu$	0.3
Kayma Modülü (GPa)	$G$	73
Akma gerilmesi (GPa)	$A$	0.25598
Pekleşme Modülü (GPa)	$B$	0.16258
Pekleşme üs katsayısı	$n$	0.2571
Şekil değiştirme sabiti	$C$	0.022
Sıcaklık üs katsayısı	$m$	1
Erime sıcaklığı (K)	$T^*$	1800

Tablo 3. AA7075-T651 malzemesine ait mekanik özellikler. (Flores-Johnson vd., 2014).

Özellikler	Sembol	Vurucu
Elastisite Modülü (GPa)	$E$	70
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	2700
Poisson oranı	$\nu$	0.3
Kayma Modülü (GPa)	$G$	26.92
Akma gerilmesi (GPa)	$A$	0.520
Pekleşme Modülü (GPa)	$B$	0.477
Pekleşme üs katsayısı	$n$	0.52
Şekil değiştirme sabiti	$C$	0.001
Sıcaklık üs katsayısı	$m$	1
Erime sıcaklığı (K)	$T^*$	893

### Johnson-Cook Hasar Kriteri

Akma sınırının üstüne çıkan gerilme durumlarında maksimum plastik birim uzama değeri (kopma sınırı) aşıldığı anda kopma başlayacaktır (Wang, K., 2016). *Johnson-Cook* hasar kriteri (2) eşitliğinde verilmektedir (Wang, K., 2016).

$$\varepsilon_f = \left[ D_1 + D_2 + \exp\left(D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma_s}\right) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*] \quad (2)$$

Burada;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  hasar parametreleri,  $\sigma_m$  üç yöndeki normal gerilmelerin ortalaması,  $\sigma_s$  *von Mises* eşdeğer gerilmesidir.

Tablo 4. *St37* malzemesine ait *Johnson-Cook* hasar parametreleri. (Ozturk, G., 2010).

Özellikler	Sembol	Vurucu
HASAR PARAMETRESİ 1	$D_1$	0.05
HASAR PARAMETRESİ 2	$D_2$	3.44
HASAR PARAMETRESİ 3	$D_3$	-2.12
HASAR PARAMETRESİ 4	$D_4$	0.002
HASAR PARAMETRESİ 5	$D_5$	0.61

Tablo 5. *AA7075-T651* malzemesine ait *Johnson-Cook* hasar parametreleri. (Flores-Johnson vd., 2014).

Özellikler	Sembol	Vurucu
HASAR PARAMETRESİ 1	$D_1$	0.096
HASAR PARAMETRESİ 2	$D_2$	0.049
HASAR PARAMETRESİ 3	$D_3$	-3.465
HASAR PARAMETRESİ 4	$D_4$	0.016
HASAR PARAMETRESİ 5	$D_5$	1.099

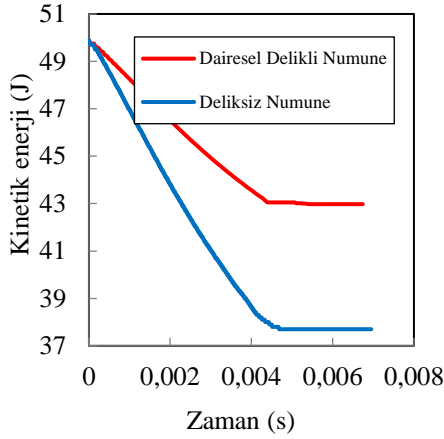
### Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında darbe test yöntemlerinden biri olan *Charpy* darbe deneyi *St37* çelik numuneler üzerinde uygulanmış olup, numunelerin darbe dirençleri hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Sayısal çalışmada ek olarak deliksiz ve ortasında dairesel delik bulunan modeller için *AA7075-T651* alüminyum numunelerin darbe dayanımları belirlenerek *St37* çelik numuneler ile kıyaslanmıştır. Numuneler uygun ölçülerde hazırlandıktan sonra, 49.05 J kapasiteli universal *Charpy* darbe test cihazına bağlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Deneyler hem ortasında dairesel delik bulunan numuneler için hem de deliksiz numuneler için üçer kez tekrarlanmıştır. Darbe deneyi sonrası numune görüntüleri Şekil 6'da sunulmuştur. Deneyde kullanılan vurucu modeli *Solid Works* programında üç boyutlu olarak modellenmiş olup *LS-DYNA* programına aktarılmıştır. Sınır şartları olarak; mesnetler ankastre mesnet olarak kabul edilmiş ve vurucunun yalnızca vuruş yönünde hareket etmesi sağlanmıştır. Vurucunun numuneye ilk temas hızı, bırakıldığı yüksekliğe bağlı olarak 3.836 m/s olarak hesaplanmış ve programa tanımlanmıştır. Vurucunun temas anındaki ve çarpma sonrasındaki kinetik enerjileri farkı, numunelere ait darbe dayanımlarını göstermektedir. Sayısal analiz sonucunda, ortasında dairesel delik bulunan numuneler ve deliksiz numuneler için darbe dayanımları Şekil 7'de verilmiştir.



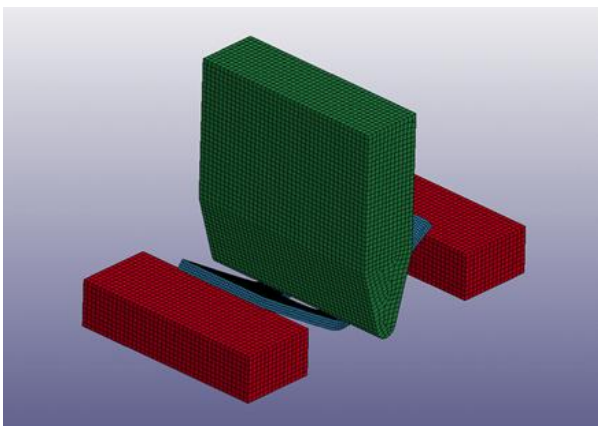
1 nolu numune: DN1 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 6.87 J	2 nolu numune: DN2 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 7.36 J	3 nolu numune: DN3 Boyutlar 50x20x2 mm $d = 9$ mm Darbe sönümlenme enerjisi: 6.87 J
---	---	---

Şekil 6. Darbe testi sonrasında ortasında dairesel delik bulunan numuneler.

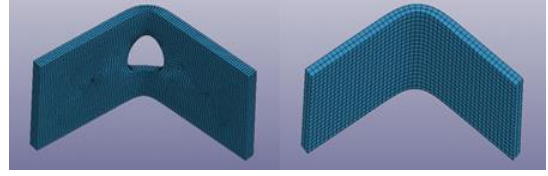


Şekil 7. Dairesel delikli ve deliksiz numuneler için vurucunun kinetik enerjisi – zaman grafiği.

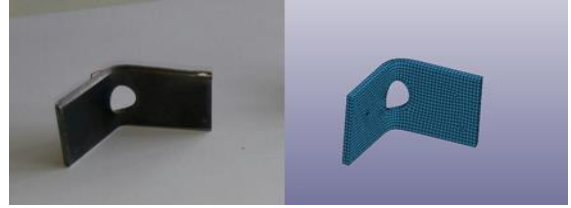
Şekil 7'deki grafik incelendiğinde, ortasında dairesel delik bulunan numuneye, vurucunun temas anındaki ( $t=0$  s) kinetik enerjisi 49.89 J, çarpma sonrasında ( $t=0.0044$  s) 43.05 J olarak ölçülmüştür. Burada;  $t$  zaman parametresidir. Kinetik enerjiler arasındaki fark 6.84 J olarak hesaplanmış olup aynı zamanda dairesel delikli numunelerin darbe dayanımı olarak belirlenmiştir. Deliksiz numuneler için darbe dayanımı hesaplandığında bu değer 12.19 J olarak bulunmuştur. Vurucunun numuneye çarpma anı sonrası sonlu elemanlar modeli Şekil 8'de gösterilmiştir. Darbe deneyi sonrası numunelere ait sonlu elemanlar modeli Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 8. Vurucunun numuneye çarpma anı sonrası sonlu elemanlar modeli.



Şekil 9. Darbe deneyi sonrası numunelere ait sonlu elemanlar modeli.



Şekil 10. Darbe deneyi sonrası St37 numunesine ait deneysel ve sayısal hasar resimleri.

Tablo 4. Deliksiz numunelere ait deneysel ve sayısal darbe dayanımları.

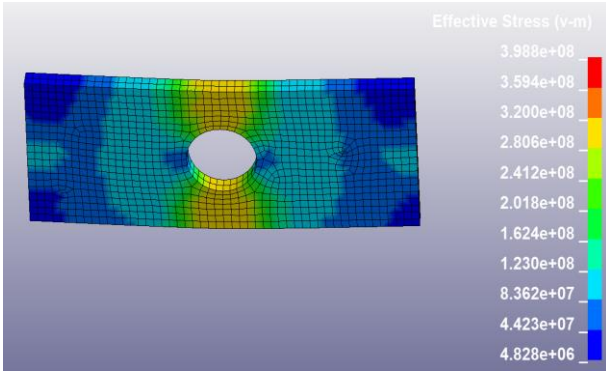
Ölçüm (J)	Deneysel	Sayısal
1 NOLU NUMUNE (N1)	12.26	12.19
2 NOLU NUMUNE (N2)	12.95	12.19
3 NOLU NUMUNE (N3)	13.14	12.19
ORTALAMA	12.78	12.19

Tablo 5. Ortasında dairesel delik bulunan numunelere ait deneysel ve sayısal darbe dayanımları.

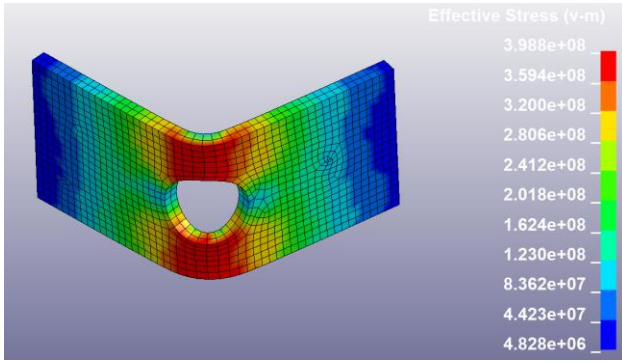
Ölçüm (J)	Deneysel	Sayısal
1 NOLU NUMUNE (DN1)	6.87	6.84
2 NOLU NUMUNE (DN2)	7.36	6.84
3 NOLU NUMUNE (DN3)	6.28	6.84
ORTALAMA	6.83	6.84

Deneysel sonrası numunelerin deneysel ve sayısal olarak hasar görüntüleri Şekil 10'da verilmiştir. Deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak üç numune üzerinden alınan deney sonuçlarının ortalamasına bakıldığında sonuçların oldukça

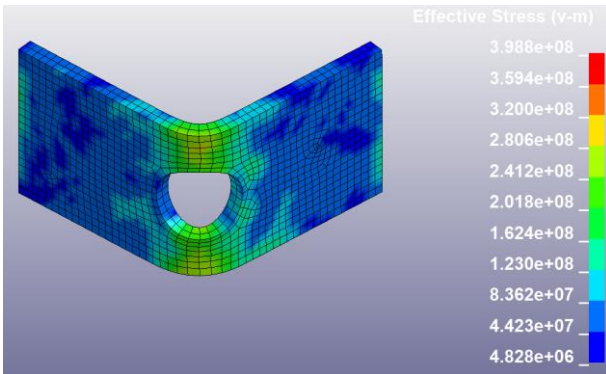
yakın olduğu tespit edilmiş ve Tablo 4 ve 5'te sunulmuştur.



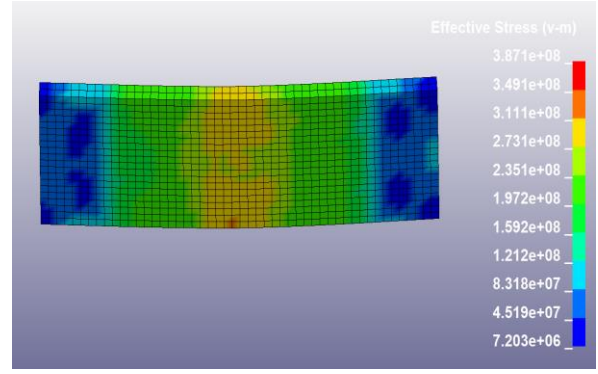
Şekil 11. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.001893$  s).



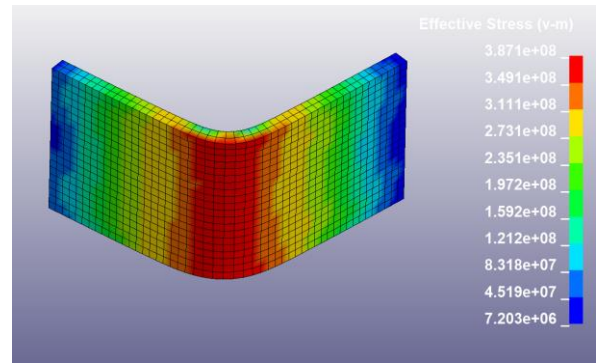
Şekil 12. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.003787$  s).



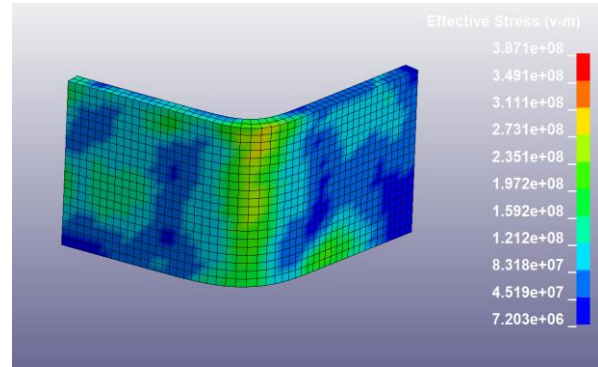
Şekil 13. Delikli numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.007765$  s).



Şekil 14. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.001893$  s).



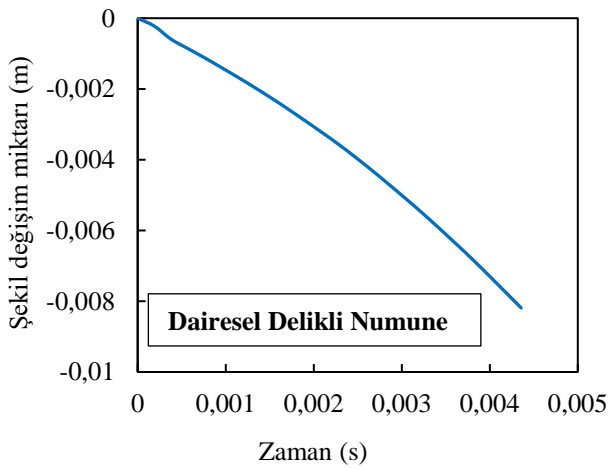
Şekil 15. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.003787$  s).



Şekil 16. Deliksiz numunelere ait von Mises gerilme dağılımı ( $t=0.007765$  s).

Dairesel delikli ve deliksiz numunelerde vurucu ucunun çarpması ile birlikte ortaya çıkan von Mises gerilme dağılımları sunulmuştur (Şekil 11-16). Grafikler incelendiğinde ortasında dairesel

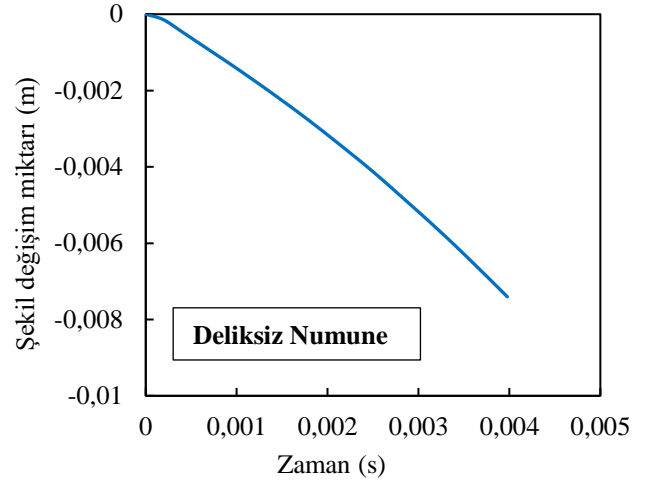
delik bulunan numunelerin delik çevresindeki gerilme dağılımı, temas anı başlangıç ( $t=0$  s) kabul edilmek şartıyla  $t= 0.003787$  s'de maksimum değere ulaşmıştır. (398.8 MPa) Deliksiz numuneler için bu değer 387.1 MPa olarak ölçülmüştür. Çarpma esnasında numunelerin vurucu doğrultusundaki zamana bağlı şekil değişim miktarları grafikler halinde Şekil 17'de ve Şekil 18'de verilmiştir. Deliksiz numunelerin vurucu doğrultusundaki maksimum şekil değişim miktarı 7.40 mm olarak ölçülürken, ortasında dairesel delik bulunan numunelerde bu değer 8.18 mm olarak belirlenmiştir.



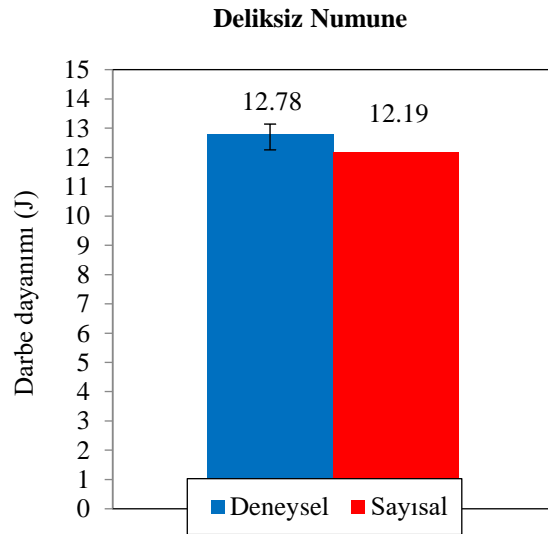
Şekil 17. Numunenin vurucu doğrultusundaki şekil değişim miktarı – zaman grafiği.

Deliksiz ve ortasında dairesel delik bulunan numunelere ait deneysel çalışma verileri ile sayısal analiz sonucunda elde edilen veriler arasında kıyaslama yapıldığında; aralarında çok küçük hata payları bulunduğu Şekil 19'da ve Şekil 20'de gözlemlenmiştir. Grafiklerde, numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen darbe dayanımı sonuçlarının aralığı ve ortalaması gösterilmiştir. Delik geometrilerinin darbe dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı delik geometrilerine sahip numunelerin darbe dayanımları karşılaştırılmıştır (Şekil 21). İncelemede, en düşük darbe dayanımı dairesel delikli numunelerde (6.84 J) görülürken, üçgen delikli numunelerin darbe dirençleri en yüksek (9.71 J) olarak gözlemlenmiştir. AA7075-T651 alüminyum ve St37 çelik malzemeli numunelerin

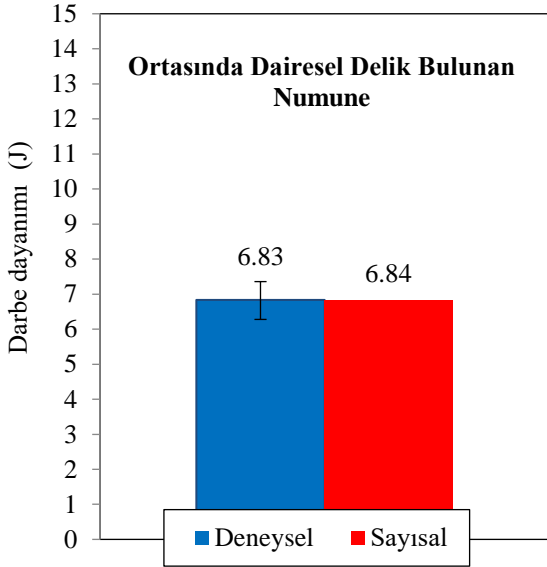
darbe dayanımları, dairesel delikli ve deliksiz modeller için değerlendirilmiştir (Şekil 22). Grafik incelendiğinde her iki model için de St37 çelik numunelerinin AA7075-T651 alüminyum numunelere göre üstünlüğü net olarak gözlemlenmiştir.



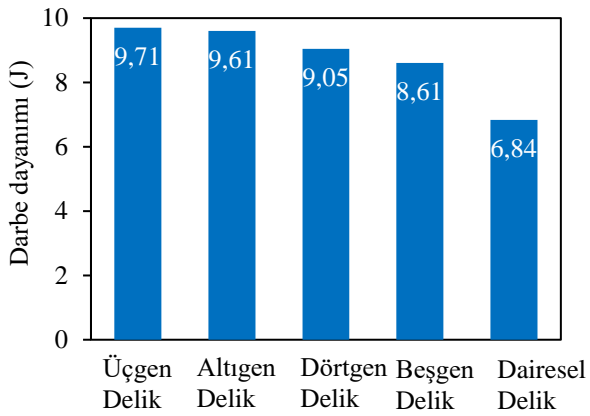
Şekil 18. Numunenin vurucu doğrultusundaki şekil değişim miktarı – zaman grafiği.



Şekil 19. Deliksiz numunelerin deneysel ve sayısal olarak darbe dayanımlarının karşılaştırılması.



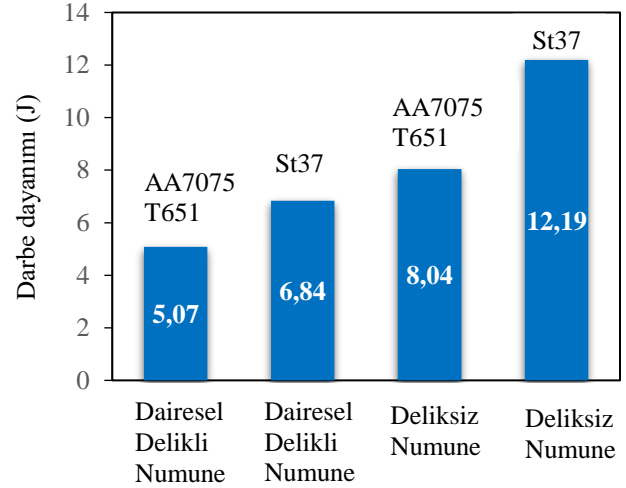
Şekil 20. Ortasında dairesel delik bulunan numunelerin deneysel ve sayısal olarak darbe dayanımlarının karşılaştırılması.



Şekil 21. Delik geometrilerine göre darbe dayanımlarının karşılaştırılması.

Numunelerin darbeye karşı dirençleri göz önüne alındığında; deliksiz numunelerin, ortasında dairesel delik bulunan numunelere karşı üstünlüğü net bir şekilde gözlemlenmektedir. Numune bünyesinde açılan 9 mm çapındaki dairesel deliğin darbe direncini %46.53 düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum; kullanılan malzemelerin zamanla çalışma şartları da göz önüne alınarak çatlak, çentik ya da delik gibi sürekliliği bozan etkenlerin malzemelere ait darbe dirençleri üzerinde büyük etkilerinin olduğunu ve önlemler alınmaması durumunda

ciddi sonuçlar doğuracağını göstermektedir. Çentik geometrisi de ayrıca darbe enerjisini etkileyen parametredir. Gaith ve Khan (2013) U-çentikli numunelerin kırılma enerjilerinin V-çentikli numunelerden % 15.5 daha fazla olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 22. St37 Çelik - AA7075-T651 Alüminyum numunelerine ait darbe dayanımlarının karşılaştırılması

Sonuçlar değerlendirildiğinde, deneysel çalışmalar ile sayısal analiz sonuçlarının çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ghaith (2009) izotropik malzeme için darbe testinde deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki farkın % 5'i geçmediğini göstermiştir. Bu çalışmada, maksimum fark % 4.62'dir. Bu sayede sonlu elemanlar metodunun önemi bir kez daha ortaya konulmuş olup, karmaşık ve farklı geometrilere sahip numuneler için deneylere gerek kalmadan istenilen analizlerin bu metot ile yapılabileceği gözlemlenmiştir. Çalışma kompozit malzemeler için geliştirilebilir. Ancak kompozit malzemeler için sonlu elemanlar metodu ile darbe analizi yapılırken, bu malzemeler için uygun hasar parametresi kullanılmasına ve malzeme tipi seçilmesine dikkat edilmelidir. Zira ortotropik malzemelerin hasarı, yapısındaki tabakaları oluşturan fiber ve matris nedeniyle çok daha karmaşıktır ve özel parametreler gerektirir.

## Kaynaklar

- Ali, M.B., Abdullah, S., Nuawi, M.Z. ve Ariffin, A.K., (2011). Test simulation using finite element method, IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 17,1.
- Altenhof, W., Raczy, A., Laframboise, M., Loscher, J. ve Alpas, A., (2004). Numerical simulation of AM50A magnesium alloy under large deformation, *International Journal of Impact Engineering*, 30(2), 117-142.
- Ansari, M. M. Ve Chakrabarti, A., (2016). Impact behavior of FRP composite plate under low to hyper velocity impact, *Composites Part B*, 95, 462-474.
- Banerjee, A., Dhar, S., Acharyya, S., Datta, D., ve Nayak, N. (2015). Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel. *Materials Science and Engineering: A*, 640, 200-209.
- Buzyurkin, A. E., Gladky, I. L., ve Kraus, E. I., (2015). Determination and verification of Johnson–Cook model parameters at high-speed deformation of titanium alloys, *Aerospace science and technology*, 45, 121-127.
- Ceylan, İ., (2008). Metallerin plastik şekillendirilmesinde kullanılan malzeme modellerinin sonlu elemanlar ile analizi, *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ghaith, F. A. (2010). Nonlinear finite element modeling of charpy impact test, *Advanced materials research*, Trans Tech Publications, 83, 182-189.
- Ghaith, Fadi. ve A. Khan., (2013). Three dimensional nonlinear finite element modeling of charpy impact test, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, IAEME Publication, 4(4), 377-386.
- Jeong, D. Y., Yu, H., Gordon, J. E. ve Tang, Y. H., (2008). Finite element analysis of un notched charpy impact tests, *Proceedings of the Materials Science and Technology 2008 Conference and Exhibition*.
- Kılıçaslan, C. ve Odacı, İ.K., (2012). Düşük hızlarda darbeye maruz kalan 1050 H14 Ve 3003 alüminyum alaşımı plakalarda hasar oluşumu ve sonlu elemanlar simülasyonları, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53, 632, 40-48.
- Kim, J. B., Shin, H., ve Yoo, Y. H., (2015). A calibration of the Wierzbicki-Xue damage model using charpy test results, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences Publishing, 26.
- Kumar, M., Devaraj, M. R. ve LakshmiNarayana, H., (2012). Finite element modelling for numerical simulation of charpy impact test on materials, *International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering*, Industrial Engineering and Management Studies.
- Liu, C., Zhang, Y. X., ve Li, J., (2017). Impact responses of sandwich panels with fibre metal laminate skins and aluminum foam core. *Composite Structures*, 182, 183-190.
- Madhusudhan, D., Chand, S., Ganesh, S., ve Saibhargavi, U., (2018). Modeling and simulation of charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus, IOP Conference Series, *Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 330,1.
- Majzoobi, G. H., Morshedi, H. ve Farhadi, K., (2018). The effect of aluminum and titanium sequence on ballistic limit of bi-metal 2/1 FMLs, *Thin-Walled Structures*, 122, 1-7.
- Ozturk, G., (2010). Numerical and experimental investigation of perforation of ST-37 steel plates by oblique impact, *Master Thesis*, Mechanical Engineering Department, Middle East Technical University, Ankara.
- Puech, L. Ramakrishnan, K. R., Le Moigne, N., Corn, S., Slangen, P. R., Le Duc, A., Boudhani, H. ve Bergeret, A., (2018). Investigating the impact behaviour of short hemp fibres reinforced polypropylene bio composites through high speed imaging and finite element modelling. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 109, 428-439.
- Santiago, R. C., Cantwell, W. J., Jones, N., ve Alves, M., (2018). The modelling of impact loading on thermoplastic fibre-metal laminates, *Composite Structures*, 189, 228-238.



- Serizawa, H., WU, Z. ve Murakawa, H., (2001). Computational analysis of charpy impact tests using interface elements (Mechanics, Strength and Structure Design), *Transactions of JWRI*, 30(2), 97-102.
- Trajkovski, J., Kunc, R., Pepel, V., ve Prebil, I., (2015). Flow and fracture behavior of high-strength armor steel PROTAC 500, *Materials & Design*, 66, 37-45.
- Wang, K., (2016). Calibration of the Johnson-Cook failure parameters as the chip separation criterion in the modelling of the orthogonal metal cutting process, *Ph. D. Thesis*, McMaster University, Kanada.
- Wang, H., Ramakrishnan, K. R., ve Shankar, K., (2016). Experimental study of the medium velocity impact response of sandwich panels with different cores, *Materials and Design*, 99, 68-82.
- Zmindak, M., Pelagić, Z., Pastorek, P., Močilan, M. ve Vybošťok, M., (2016). Finite element modelling of high velocity impact on plate structures. *Procedia Engineering*, 136, 162-168.
- Flores-Johnson, E. A., Shen, L., Guimatsia, I., ve Nguyen, G. D., (2014). Numerical investigation of the impact behaviour of bioinspired nacre-like aluminium composite plates. *Composites Science and Technology*, 96, 13-22.

## Experimental and numerical analysis of Charpy impact test

### Extended abstract

*In this study, impact absorb energy of St37 Steel and AA7075-T651 aluminum determined by applying Charpy impact test, the specimen models that having different hole geometry (triangle, quadrilateral, pentagon, hexagon and circular) at the center, and without a hole were used experimentally and numerically. The energy damping mechanism was investigated by both experimental and numerical methods. As a results of study, when impact absorb energy of specimens were compared, good agreement was observed between numerical and experimental methods.*

*In experimental procedure, specimens were prepared in sizes 50x20x2 mm also were drilled with a diameter of 9 mm to examine the effect of circular hole. Tests were implemented three times for each of specimens in universal impact test device that capacity was 49.05 J and weigh 6.78 kg.*

*In numerical procedure ANSYS and LS-DYNA programs were used respectively as preprocessor and solver. In impact problems, especially temperature effect, strain rate effect and strain hardening are quite important. To define these effects into program, Johnson-Cook plastic material model and Johnson-Cook damage criteria which were presented between Tables 2 and 5. Mat 15 (Johnson- Cook) material model was preferred for St37 steel and AA7075-T651 aluminum specimens. Similarly Mat 20 (Rigid) material models selected for striker and supports. Furthermore, striker contact surface was modelled as three dimension in SolidWorks software than imported to ANSYS packet program and striker is modelled as a rigid body. Displacement of the striker is constrained to move in vertical direction. The initial velocity of striker is calculated 3.836 m/s similar as instrument charpy impact machine.*

*In addition to these parameters carefully studied in the study, the mechanical properties of the material, boundary and loading conditions are also other factors that need to be defined correctly. Suitable impact surface model, finite element mesh density and contact parameter should be determined. Then, numerical solutions must be done for the real problem.*

*There are 57626 nodes and 47528 elements in the finite element mesh structures for perforated models. Similarly, 39.334 nodes and 33.000 elements for models that having without a hole The modeling process take place after defined that contact parameter between striker, specimen and support models and supports are constrained to all directions as both displacement and rotate.*

*Impact absorb energy results compared as experimental and numerical besides kinetic energy-time graph were evaluated between specimen models that having circular hole at the center and without a hole. According to results, very little margin of error was observed between experimental and numerical results.*

*Considering the resistance of specimens against to impact, specimen that without hole more superior than specimen models that having different hole geometry at the center. Similarly, when compared between specimen models that having different hole geometry at the center, triangular perforated specimens are better than other samples. According to results, when center of specimen was drilled with circular hole 9 mm in diameter, impact resistance decreased 46.53 %. Factors such as crack, notch and hole are very important for impact absorb energy. Therefore, unless precautions are taken, it is clear that would have serious consequences.*

*The results showed that complex and different specimens can be analyzed with finite element method without the need of experiments. Study should be improved for composite materials with appropriate damage criteria. In the future work, it can be focused on this problem.*

**Keywords:** St37, AA7075-T651 aluminum, LS-DYNA, Charpy Impact Test, Johnson-Cook, ANSYS



# Elektroforetik Yöntem Kullanılarak Mg-AZ 31 Alaşımının Go/Hap ile Kaplanması ve Sinterleme Sıcaklığının Yüzeyin Mikroyapısına Etkilerinin İncelenmesi

**Erkan BAHÇE\***

*İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya*

[erkan.bahce@inonu.edu.tr](mailto:erkan.bahce@inonu.edu.tr) ORCID: 0000-0001-5389-5571, Tel: (422) 377 30 00 (4810)

Geliş: 02.02.2019, Revizyon: 19.03.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

## Öz

*Mg ve alaşımları, sahip oldukları yüksek biyouyumluluk, kemiğe yakın elastisite modülü, kemik gelişimine yardımcı olması, gibi özellikleri nedeniyle biyomedikal alanda kullanım açısından ilgi çekmektedir. Ancak Mg elementinin korozyona olan yüksek afinitesi, vücut sıvısı içerisinde bu alaşımların uzun süreli kalıcı implant malzemesi olarak kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle bu alaşımların biyomalzeme olarak uzun süreli kullanımlarını sağlayabilmek ve biyouyumluluk, biyoaktivite gibi özelliklerini geliştirmek için yüzeyleri kaplanmaktadır. Bu çalışmada Mg AZ31 alaşımı üzerine korozyon dayanımını ve biyoaktivitesini artırmak amaçlı elektroforetik yöntemle (Hidroksi apatit) HAp/ GO (Grafen oksit) kompoziti kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrası 3 farklı sıcaklıkta sinterleme yapılarak sinterleme sıcaklığının film tabakasının mikroyapısı üzerindeki etkileri SEM, XRD ile incelenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Mg-AZ31, Elektroforetik, Sinterleme, Grafen oksit, Hidroksi apatit

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Magnezyum insan vücudunda belli bir oranda bulunan ve büyük bir kısmı kemik dokuda depolanan elementtir (Narayanan vd., 2015). Magnezyum elementinin kemik gelişimine olan katkısı, üstün biyoyumluluk özelliği, vücut içinde düşük toksik özelliğinden ve vücuttan doğal yollarla atılabilmesinden dolayı biyomalzeme olarak kullanımını açısından ilgi çekmektedir (Virtanen , 2011). Buna ek olarak, magnezyumun biyomalzeme olarak belki de en çarpıcı özelliği kemik dokusundaki hidroksiapatit kristallerinde kalsiyumun yerine geçebilmesi ve böylelikle kemik büyümesine yardımcı olmasıdır (Saris vd, 2000; Staiger vd, 2006). İmplant malzemesi olarak en yaygın kullanılan metal alaşımları olan 316 L paslanmaz çeliği, Ti ve alaşımları, CoCr alaşımlarının kullanım yerine göre birbirine üstünlükleri ve tercih edilme nedenleri varken üçünün de özellikle yük taşıyıcı/ iletici implant malzemesi olarak kullanımında kemiğinkine kıyasla oldukça yüksek değerlerde elastikiyet modülü değerlerine sahip olmaları oldukça büyük bir dezavantaj olmaktadır (Park vd, 2007). Kemik için bu değer 35-40 GPa iken Ti ve alaşımlarında bu değer 110 GPa, CoCr alaşımlarında 220 GPa ve 316 L paslanmaz çeliğinde ise 190 GPa olmaktadır. Kemik ve implant malzemesinin elastikiyet modülü arasındaki farkın bu denli büyük olması gerilme kalkını etkisi yaratmaktadır. Bu durumda implantın erken gevşemesinde önemli bir rol oynamaktadır (Affatato, 2012). Bu açıdan da magnezyum ve alaşımlarının implant malzemesi olarak kullanılan diğer alaşımlara göre daha düşük elastisite modülüne sahip olması onun implant malzemesi olarak kullanımını çekici hale getirmektedir (Seyeraoufi vd, 2015). Fakat magnezyum ve alaşımlarının vücut sıvısının korozif ortamına maruz kaldıklarında bir biyomedikal malzemedan beklenen yüksek korozyon direncini sağlayamadığı, hızlı bir şekilde korozyona uğradığı ve kemik gelişimine destek olurken çözünerek hidrojen gazını oluşturduğu yapılan çalışmalar sonucu

görülmüştür. Bu istenmeyen özellikten dolayı geçmişte özellikle üstün korozyon direnci ve yük taşıma kabiliyeti isteyen implant malzemesi olarak magnezyum ve alaşımlarının kullanım alanını daralmıştır. Günümüzde ise biyomalzemelerin yüzeyleri, korozyon direncini arttırmak, sürtünme katsayısını düşürerek aşınma direncini arttırmak için koruyucu film kaplamalar yapılmaktadır (Narayanan vd, 2015).

Biyomalzemelerin ince film kaplamaları uygulamalarında fiziksel buhar biriktirme yöntemi, kimyasal buhar biriktirme yöntemi gibi kaplama yöntemleri ile istenilen kalınlıkta, yüksek adhezyona sahip, düşük sürtünme katsayıları, yüksek korozyon ve aşınma dayanımı veren kaplamalar yapılabilmektedir (Glocker vd, 2016). Ancak bu tekniklerin gerek cihaz kurulum maliyetlerinin gerekse işletme maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle Sol-Jel, Biyomimetik, elektroforetik kaplama gibi görece daha ucuz maliyetli kaplama yöntemleri de biyomalzemelerin yüzey kaplama işlemlerinde kullanılmaktadır (Wen, 2015). Elektroforetik kaplama prosesi bir süspansiyon içerisine kaplama bileşeni olarak kullanılacak olan malzemelerin çeşitli işlemlerle homojen dağılımının sağlanarak, bir kutuba kaplanacak malzemeyi diğer kutuba iletken bir başka metalin elektrot bağlanarak süspansiyon içerisine daldırılıp bir doğru akım güç kaynağından potansiyel fark uygulanarak süspansiyon içerisinde ki yüklü partiküllerin zıt yüklenmiş malzeme üzerine film şeklinde biriktirilmesinden ibarettir (Besra vd, 2007). Kaplama prosesi sonrasında yüzeyde biriken filmlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlı olarak sinterleme işlemi yapılır. Yapılan sinterleme işlemiyle film tabakasını oluşturan nano ve mikron boyuttaki partiküller arasındaki bağ kuvvetleri gelişimiyle kaplamanın yüzey bütünlüğü artırılır, poroziteler azaltılır, sertlik ve elastikiyet modülü artırılır. Bunun sonucunda film tabakasının altlık malzemeye adhezyonu artırılır ve yüzeyin sürtünme özellikleri, korozyon direnci, aşınma direnci artırılmış olur (Besra vd, 2007; Sarkar, 2002).

Metalik biyomalzemelerin korozyon direncin arttırmak osseointegrasyon sağlamak için yüzeyleri ince HAp tabakası ile kaplanabilir (Wen vd, 2015). HAp vücudun doğal sert dokularındaki biyolojik apatite olan kimyasal ve yapısal benzerliği nedeniyle kemik gelişimini ve hızla iyileşmesini sağlar (Mucalo, 2015). Bu nedenle biyomedikal alanda implant yüzeylerin kaplanmasında kullanım alanı oldukça geniştir. Ayrıca hidroksiapatitin içerisine, karbon atomlarının kovalent bağlarla birbirine bağlı olan, farklı altlık malzemelere transfer edilebilir eşsiz özelliklere sahip grafen oksit (GO) ilave edilerek kaplama bileşenlerinden üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde edilebilir (Jankovic vd, 2015).

Grafen oksitin HAp 'e geniş tutunma yüzeyleri sağlayarak Grafen oksit ilaveli hidroksiapatit kaplamalarda mikrosertlik, elastik modülü, kırılma tokluğu ve korozyon dayanımının arttığı yapılan çalışmalar ve araştırmalarda görülmüştür (Baradaran vd, 2014; Li, 2014; Dosic vd, 2017). Mg alaşımlarının biyomedikal alanda implant malzemesi olarak kullanımını arttırmaya yönelik çeşitli yüzey kaplama çalışmaları yapılmıştır. Kaplama uygulamalarında fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri, sol-jel, elektroforetik kaplama gibi farklı metotlar kullanılmıştır (Narayanan vd, 2015). H. Hornberger ve arkadaşları 2012 yılında Mg alaşımlarının yüzeylerinin biyomedikal kaplanmaları üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır (Hornberger vd, 2012). Bu alanda, Mg alaşımlarının elektroforetik yöntemle kaplama çalışmalarında ön plana çıkan çalışmaların bir literatür özeti aşağıda verilmiştir. Sun, Mg alaşımı yüzeyini kendi-kendine monte olan kolodyal partikülleriyle elektroforetik yöntemle kaplamışlar ve kaplamanın malzemenin sitouyumluluk, anti-bakteryel özellikleri ve korozyon dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda korozyon direnci değerlerinde belirgin artış elde etmişlerdir. Ayrıca elde ettikleri kaplamanın hücre tutunumu ve gelişimi için kararlı ve bütünlüklü bir yüzey sağladığını belirtmişlerdir

(Sun vd, 2016). Amiri, Mg-AZ91 alaşımı üzerine nano boyutlu zirkonya film tabakasını elektroforetik yöntemle biriktirmişlerdir (Amiri vd, 2017). Kaplama proses parametrelerinin kaplamanın adhezyonu, morfolojisi ve kalınlığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca elektrokimyasal korozyon deneyleriyle kaplamaların korozyon davranışını inceleyerek elde edilen film tabakasının alaşımın biobozunurluğuna etkisini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda optimize ettikleri kaplama parametreleriyle Zirkonya kaplamaların malzemenin korozyon direncini belirgin biçimde artırdığını ve malzemedeki iyon salınımına karşı film tabakasının aktif bir bariyer görevi görebildiğini tespit etmişlerdir (Amiri, 2017).

Heise vd. Mg alaşımı (WE43) üzerine, kitosan/45S5 biyoaktif cam kompozitini elektroforetik yöntemle kaplamışlar ve kaplamanın alaşımın korozyon davranışına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda yaklaşık olarak 2 µm kalınlığında elde ettikleri film tabakalarının simüle vücut sıvısı içinde korozyon davranışı ve biyoaktivitesini artırdığını tespit etmişlerdir (Heise, 2017). Kumar Mg-3Zn alaşımının ortopedik uygulamalarda kullanılabilirliğini geliştirmek için yüzeyine hidroksi apatit film tabakasını elektroforetik yöntemle kaplamışlardır (Kumar vd, 2016). Kaplama işlemi sonrasında yaşlandırma ve kurutma sonrası numunelere 300 ve 400°C'de sinterleme yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda çatlaksız üniform film tabakasının düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip altlık malzeme ile yüksek sinterleme sıcaklığında elde edildiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca alaşımın korozyon dayanımını da HAp kaplama ile 25 kat arttığını bulmuşlardır (Kumar vd, 2016). Asl vd. Mg-AZ31 alaşımı üzerine elektroforetik yöntemle HAp kaplamaları değişen potansiyel farklar uygulayarak yapmışlardır. Kaplama işlemleri sonrasında 300 °C sıcaklıkta sinterleme işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Karakterizasyon deneyleri sonucunda artan potansiyel farkla beraber kaplama kalınlıklarının arttığını böylece de korozyon dayanımının arttığını tespit etmişlerdir.

Ancak kaplamaların altlık malzemeye adhezyonun zayıf olduğunu belirlemişlerdir (Asl vd, 2014).

Chong , Mg-AZ31 alaşımı üzerine sabit gerilimle bir tek tabakalı HAp, bir de aynı gerilimde ancak daha kısa sürelerde 5 tabakalı HAp kaplama yapmışlar ve kaplamaların mikroyapılarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda çok tabakalı kaplamalarda tek tabakalıya kıyasla çok daha yoğun, daha homojen, daha iyi adhezyona sahip ve çatlakların hem sayısı hem de çaplarının çok azaldığı bir kaplama elde etmişlerdir (Chong, 2015). Rojae vd. kaplama öncesinde mikro ark oksidasyonu (MAO) ve MgF<sub>2</sub> konversiyon yüzey işlemleri uyguladıkları Mg-AZ91 alaşımı yüzeyini elektroforetik yöntemle HAp kaplamışlardır. Çalışmaları sonucunda MAO/HAp kaplamalı Mg-AZ91 alaşımının yüksek biyouyumluluklu düşük bozunma hızını sağlayan düşük korozyon akımı değerleri verdiği sonucuna ulaşmışlardır (Rojae vd, 2013). Sreekanth Mg-AZ31 alaşımının yüzeyini MgO/HAp kompozitiyle plazma elektrolit oksidasyon ve elektroforetik yöntemle kaplamışlardır. Yaptıkları korozyon deneyleri sonucunda MgO/HAp kaplamanın Mg-AZ 31 alaşımının korozyon direncini belirgin biçimde artırdığı sonucuna varmışlardır (Sreekanth vd, 2012).

Yapılan literatür araştırmalarında Mg alaşımlarının biyomalzeme olarak kullanımını artırmak için yapılan elektroforetik yöntemle kaplama çalışmalarında, elektroforetik yöntemde önemli bir aşama olan sinterleme aşamasının birçok çalışmada yapılmadığı veya yapılan çalışmalarda da düşük sıcaklıklarda yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada Mg-AZ 31 alaşımı elektroforetik yöntemle GO/HAp kompoziti ile kaplanmıştır. Elektroforetik yöntemle yapılan kaplamalar sonrası farklı sıcaklıklarda uygulanan sinterleme işleminin film tabakasının mikroyapısı üzerine etkileri incelenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Materyal

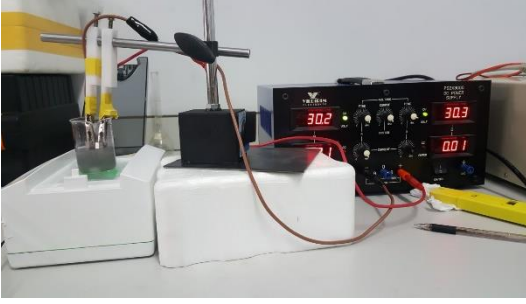
Çalışmada yüzey özellikleri geliştirmek üzere kaplanacak altlık malzeme olarak yüksek biyouyumluluk, düşük elastisite modülü ve düşük toksisite özelliklerine sahip, geniş bir kullanım alanı olan Mg-AZ31 alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın mekanik özellikleri Tablo 1 'de verilmiştir. Altlık malzemeler 5mm kalınlığındaki levhalardan lazer kesim yöntemiyle 20x15 mm boyutlarında kesilerek elde edilmiştir. Kaplama da kullanılan HAp tozları (Nanokar AŞ.) hazır olarak satın alındı. Grafen oksit için ise 0.5 mg/mL konsantrasyonunda 3-6 katmanlı nano boyutlu grafen oksit içeren hazır süspansiyon (Hazerfen Kimya A.Ş.) kullanıldı. Kaplama prosesinde kullanılacak ana süspansiyon olarak literatür araştırmalarına dayanarak etanol (%97,9 saflıkta) seçildi (Ricardis, 2012; Besra, 2007; Dickerson vd, 2012).

**Tablo 1.** Mg AZ-31 alaşımının bazı mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Elastisite Modülü (GPa)	Kırılma Tokluğu (MPa)
Mg-AZ31 alaşımı	1.74 – 2.0	41-45	15-40

### Yöntem

Mg-AZ31 alaşımı levhalardan 20x15 mm boyutlarında kesilmiş numuneler kaplama prosesi öncesinde sırasıyla 240, 400 ve 600 mesh zımpara ile parlatıldı. Yüzeyleri parlatılan numuneler aseton içerisinde 10 dakika bekletildikten sonra saf su ile yıkandı. Ve son olarak kaplama prosesine kadar etanol içinde bekletildi. Kaplamaların yapılacağı süspansiyon sıvısı olarak %97,9 saflıkta etil alkol kullanıldı. Süspansiyon hazırlanırken önce tüm süspansiyona oranla ağırlıkça %0.01 oranında GO olacak şekilde hazır etanol-GO süspansiyonu etanol içerisine karıştırıldı. Daha sonra karışım manyetik karıştırıcı üzerinde karıştırılırken tüm süspansiyona oranla ağırlıkça %1 olacak şekilde nano boyuttaki toz HAp eklenildi. Süspansiyon manyetik karıştırıcıda 30 dk karıştırıldıktan sonra kaplama işlemine geçildi.



Şekil 1. Elektroforetik Kaplama Düzenegi

Süspansiyonun homojenliğinin sürdürülebilmesi için kaplama işlemi manyetik karıştırıcıyla karıştırma işlemi devam ettirilerek yapıldı. Şekil 1'de kaplama prosesinin fotoğrafı verilmiştir. DA güç kaynağının elektrotlarının bir ucuna kaplanacak olan malzeme bağlandıktan sonra karşıt elektrot olarak ise yine Mg-AZ31 alaşımı kullanılmıştır. Katot ve anot uçları arasındaki mesafe 10 mm olarak sabitlenerek süspansiyon içerisine daldırılmıştır. Elektroforetik kaplama prosesi 60 Volt potansiyel fark uygulanarak 5 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan potansiyel fark ve kaplama süreleri deneyler yapılarak elde edilmiş optimum değerlerdir. Daha sonra kaplanmış numuneler süspansiyon içerisinden dikkatli bir şekilde çıkarıldıktan sonra oda şartlarında 1 gün süreyle kurumaya bırakılmıştır.

Yüzeyi GO/HAP kompoziti ile kaplanmış numuneler sinterleme işlemi için kapaklı kroze içerisine dikkatlice yerleştirilerek ısıtma işlemi fırınına (Protherm DC-1010) konulmuştur. Kaplamanın mikroyapısına etkilerini incelemek amacıyla sırasıyla 150, 300 ve 450 °C'de 2 saat süreyle ısıtma işlemine tabi tutulmuşlardır. 150 °C'de sinterlenen numuneler A1, 300 °C'de sinterlenen numuneler A2 ve 450 °C'de sinterlenen numuneler A3 olarak kodlanmıştır.

### Karakterizasyon

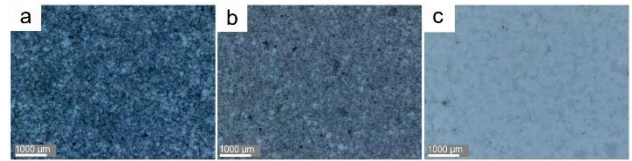
Mg-AZ31 alaşımının yüzeyinin elektroforetik yöntemle kaplanması sonrası uygulanan sinterleme işleminin kaplamanın mikroyapısına etkilerinin incelenmesi için (Leica Dm 4000 m) marka optik mikroskopunda 5x ve 20x boyutlarında görüntüler alınmıştır. Yine İnönü Üniversitesi merkezi araştırma laboratuvarlarında bulunan Leo marka SEM

cihazında kaplamaların mikroyapısının incelenmesi, kaplama kalınlıklarının tespiti için görüntüler alınmıştır. Kaplama tabakası üzerinde meydana gelen fazların tayini için XRD (Rigaku) analizleri yapılmıştır.

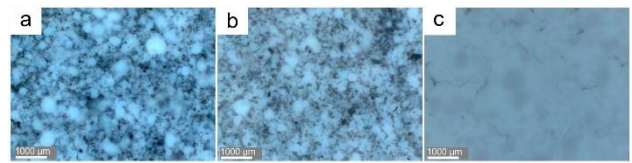
### Bulgular ve Tartışmalar

#### Optik Mikroskop İncelemeleri:

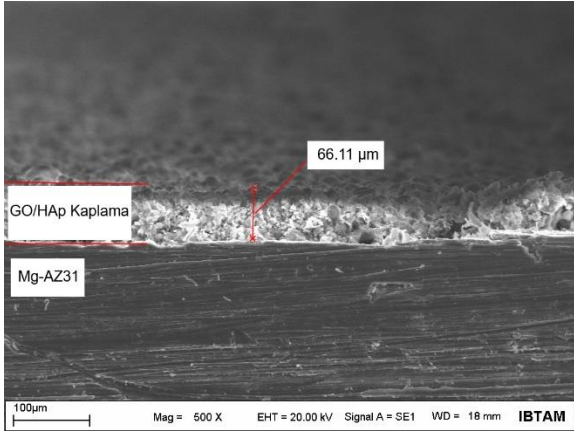
Aşağıda Şekil 1'de yapılan kaplamaların 5X büyütmede sırasıyla soldan sağa doğru 150, 300 ve 450 °C'de sinterlenmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. A resminde 150°C'de 2 saat sinterlenmiş numune de porozitelerin sayısı fazla ve yapıya yayılmış durumda olduğu görülürken, b resminde sıcaklığın 300 °C'ye çıkarılmasının etkisiyle mikroyapıdaki porozitelerin azaldığı görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının 450 °C'ye çıkarılmasıyla kaplama yapısındaki gözeneklerin diğer iki kaplamaya göre oldukça azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum 20X büyütmede alınmış görüntülerin verildiği Şekil 2'de daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 2. Kaplamaların optik mikroskopta 5x büyütmede alınmış görüntüleri a) A1 b) A2 c) A3



Şekil 3. Kaplamaların optik mikroskopta 20x büyütmede alınmış görüntüleri a) A1 b) A2 c) A3

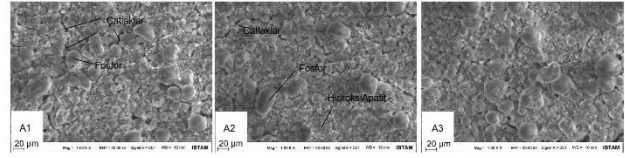


Şekil 4. A2 numunesinde kaplamanın kalınlığı ve enine yapısı

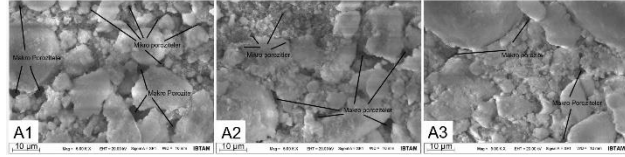
### Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri

Kaplamaların mikroyapılarının daha ayrıntılı incelenebilmesi için SEM analizleri yapılmıştır. Şekil 4'de 300 °C'de 2 saat sinterlenmiş A2 numunesi üzerindeki kaplamanın kesit SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplamaların kalınlıklarının analizi için numunelerin belirli bölgelerinden ölçümler yapılmış ve ortalama olarak yaklaşık 60 µm kalınlık değeri tesbit edilmiştir. Bu kalınlık değeri başlangıç tozlarının nano boyutları düşünüldüğünde kalın bir kaplama değeri olduğu düşünülmektedir. Kaplama proses parametrelerinden sürede bir azaltmaya gidilerek kalınlık değeri azaltılabilir. Ayrıca yine Şekil 3'de görülebildiği üzere kaplama kalınlıkları her bölgede aynı değildir. Bu durumda da artan kaplama kalınlığının yüklü partiküllerin altlık malzemeye yapışma iletkenliğini azalttığı düşünülebilir.

Aşağıda Şekil 4'de kaplamaların 1000X büyütmede alınmış SEM görüntüleri verilmiştir. A3 kaplamasının yüzeyinde A1 ve A2 'ye oranla çok daha az çatlak oluşumu olduğu göze çarpmaktadır. Kaplama kalitesinde önemli bir parametre olan kaplamanın yüzey bütünlüğünde çatlakların az olması beklenilmektedir. Yine A2 kaplamasının da A1' e oranla daha az çatlaklar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5. Numunelerin 1000X SEM Görüntüleri



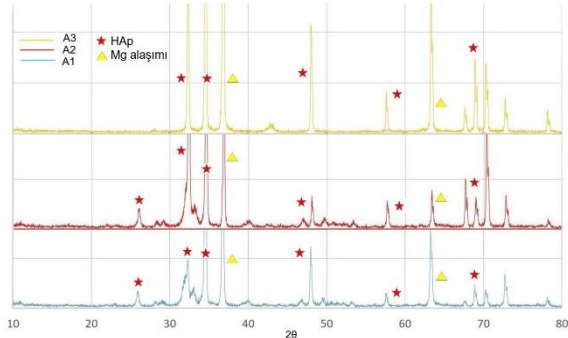
Şekil 6. Numunelerin 5000X SEM görüntüleri

Şekil 5 kaplamaların 5000x büyütmede alınmış SEM görüntülerini göstermektedir. 150°C'de sinterlenen A1 numunesinin kaplama yüzeyinde görece düşük sıcaklıkta sinterleme yapıldığı için mikro ve makro porozitelerin sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla beraber HAp tanecikleri arasında tane sınırlarının gelişmesi sonucunda bu porozitelerin çaplarında ve sayısında belirgin azalma meydana geldiği A2 kaplama görüntüsünde görülebilmektedir. Sıcaklığın 450°C'ye çıkmasıyla ise makro porozitelerin sayısının oldukça azaldığı taneler arası bağların geliştiği görülebilmektedir. Ancak yine de mikro yapıda poroziteler mevcut olduğunda görülmektedir. Bu noktada bir seramik olan HAp kristallerinin sinterleme için çok daha yüksek sıcaklıklara ihtiyacı olmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

### XRD İncelemeleri

Şekil 7'de numunelerin X ışınımı karakterizasyon sonuçları bir arada verilmiştir. Grafik incelendiğinde HAp fazlarının A1 numunesi üzerinde pikleri düşük iken yapılan sinterlemenin sıcaklığının artırılmasıyla beraber A2 ve A3 numunelerinde daha yüksek pikler yaptıkları görülmektedir. Her üç numunede de Mg piklerinin benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Yapılan sinterleme işleminde artan sıcaklığın etkisiyle A3 numunesinde; A1 ve A2 numunelerinde meydana gelen kimi fazların görülmediği tespit edilmiştir. A3 numunesinin faz analizinde diğer iki numuneye kıyasla dalgalanmalar artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak azalmıştır.





Şekil 7. Numunelerin XRD faz analizleri

## Sonuçlar

Bu çalışmada Mg-AZ31 alaşımı üzerine GO/HAp kompoziti elektroforetik yöntemle başarılı bir şekilde kaplanarak kaplamanın mikroyapısı üzerine sinterleme sıcaklığının etkisi incelenmiştir. İncelemelerin sonucunda;

-Mg-AZ31 alaşımının yüzeyinin GO/HAp kompoziti ile kaplanması sonrası 450 °C sıcaklıkta Mg alaşımının yapısının bozulmadan sinterlenebildiği görülmüştür.

-Artan sinterleme sıcaklığına bağlı olarak kaplama mikroyapısında mikro ve makro gözeneklerin hem sayılarında hem de çaplarında azalma meydana geldiği, kaplamanın daha homojen bir yapıya kavuştuğu görülmüştür, bu sonuç literatür çalışmalarında ki sonuçlarla uyumlu çıkmıştır (Jafar vd, 2017; Aminatun vd, 2017).

-Elektroforetik yöntemle kaplamalar sonrası yapıda meydana gelen çatlaklar kaplamanın kalitesini olumsuz yönde etkileyen bir parametre olduğu bilinmektedir. Yüksek sinterleme sıcaklığına bağlı olarak mikroyapıda meydana gelen tane irileşmeleri sayesinde çatlakların sayısının düşük sıcaklıklarda sinterlenen kaplamaya göre oldukça azaldığı tespit edilmiştir.

-Ancak yine de gerek yapıda mevcut porozitelerin daha da azaltılması gerekse daha ince homojen bir film eldesi için kaplama proses parametreleri ve sonrasında yapılacak sinterleme

sıcaklık ve süreleri üzerine çalışmalar yapılması gerektiği düşünülmektedir.

## Kaynaklar

- Affatato, S. (2012). Wear of orthopaedic implants and artificial joints, Woodhead Publ. Limited, Cambridge, UK
- Aminatun, A., Hikmawati, D., Yasin, M. (2017). The Effect of Sintering Temperature to the Quality of Hydroxyapatite Coating on Cobalt Alloys as the Candidate of Bone Implant Prosthesis, Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering, 32, 59-68
- Amiri, H., Mohammadi, I., Afhsar, A. (2017). Electrophoretic deposition of nano-zirconia coating on AZ91D magnesium alloy for bio-corrosion control purposes, Surface & Coatings Technology, 311, 182–190
- Asl, S.K.F., Nemeth, S., Tan, M.J. (2014), Review: Electrophoretic deposition of hydroxyapatite coatings on AZ31 magnesium substrate for biodegradable implant applications, Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 60, 74-79
- Baradaran, S., Moghaddam, E., Basirun, W.J., Mehrli, M., Sookhakian, M., Hamdi, M., Moghaddam, M.R.N., Alias, Y. (2014). Mechanical properties and biomedical applications of a nanotube hydroxyapatite-reduced graphene oxide composite, CARBON, 69, 32-45
- Besra, L., Miu, L. (2007). A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD), Progress in Materials Science, 52, 1–61
- Chong, C.Y., Bakar, T.A.A., Fadi, N.A., Hussain, R. (2015). Electrophoretic Deposition of Hydroxyapatite Coatings on AZ31: The Effect of Nanoparticle Multiple Coating Approach, Advanced Materials Research, 1125, 484-488
- Dickerson, J.H., Boccaccini, A.R. (2012). Electrophoretic Deposition of Nanomaterials, Springer Science Business Media, New York, USA
- Dosic, M., Erakovic, S., Jankovic, A., Sekulic, M.V., Matic, I.Z., Stojanovic, J., Rhee, K.Y., M.V., Stankovic, Park, S.J. (2017). In vitro investigation of electrophoretically deposited bioactive hydroxyapatite/chitosan coatings reinforced by graphene, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 47, 336-347
- Glocker, D., Ranade, S. (2016). Medical Coatings and Deposition Technologies, Scrivener Publ., Beverly, USA

- Heise, S Heise, S., Höhlinger, M., Hernandez, Y.T., Palacio, J.J.P., Ortiz, J.A.R., Wagener, V., Virtanen, S., Boccacini, A.R. (2017). Electrophoretic deposition and characterization of chitosan/bioactive glass composite coatings on Mg alloy substrates, *Electrochimica ACTA*, 232, 456-464
- Hornberger, H., Virtanen, S., Boccacini, A.R. (2012). Biomedical coatings on magnesium alloys – A review, *ACTA BIOMATERIALIA*, 8(7), 2442–2455
- Jafar, N.M., Abubakar, T., Chong, C.Y., Ahmad, N.H. (2017). Effect of Sintering Temperature on the Morphology and Adhesion Strength of Eggshell Coating on Mild Steel, *Solid State Phenomena*, 264, 190-193
- Jankovic, A., Erakovic, S., Sekulic, M.V., Stankovic, V.M., Park, S.J., Rheec, K.Y. (2015). Graphene-based antibacterial composite coatings electrodeposited on titanium for biomedical application, *Progress in Organic Coatings*, 83, 1–10
- Kumar, R.M., Kuntal, K.K., Singh, S., Gupta, P., Bhushan, B., Gopinath, P., Lahiri, D. (2016). Electrophoretic deposition of hydroxyapatite coating on Mg–3Zn alloy for orthopaedic application”, *Surface & Coatings Technology*, 287, 82–92
- Li, M., Liu, Q., Jia, Z., Xu, X., Cheng, Y., Zheng, Y., Xi, T., Wei, S. (2014). Graphene oxide/hydroxyapatite composite coatings fabricated by electrophoretic nanotechnology for biological application, *CARBON*, 67, 185–197
- Mucalo, M. (2015). Hydroxyapatite (HAp) for Biomedical Applications, “Woodhead Publ., Cambridge, UK
- Narayanan, T.S.N.S., Song, I, S. and Lee, Min-Ho. (2015). Surface Modification of Magnesium and its Alloys for Biomedical Applications Volume 2: Modification and Coating techniques, Woodhead Publ., Cambridge, UK
- Park, J., Lakes, R.S. (2007). *Biomaterials, An Introduction*, Springer Science, Business Media, New York, USA
- Riccardis, M.F.D. (2012). Ceramic Coatings Obtained by Electrophoretic Deposition: Fundamentals, Models, Post-Deposition Processes and Applications, *Ceramic Coatings - Applications in Engineering*, 43-68
- Rojaee, R., Fathi, M., Raeissi, K. (2013). Electrophoretic deposition of nanostructured hydroxyapatite coating on AZ91 magnesium alloy implants with different surface treatments, *Applied Surface Science*, 285, 664– 673
- Saris, N-E.L., Mervaala, E., Karppanen, H., Khawaja, J.A., Lewenstam, A. (2000). Review: Magnesium An update on physiological, clinical and analytical aspects, *CLIN. CHIM. ACTA*, 294, 1–26.
- Sarkar, P. (2002). Synthesis and microstructural manipulation of ceramics by electrophoretic deposition, *Proceedings of The Electrochemical Society on Electrophoretic Deposition: Fundamentals and Applications*, 2002- 21, Pennington, USA, 2002, 71–78.
- Seyedraoufi, Z. S., Mirdamadi, S. (2015). In vitro biodegradability and biocompatibility of porous Mg–Zn scaffolds coated with nano hydroxyapatite via pulse electrodeposition, *trans. Nonferrous met. Soc. China*, 25, 4018–4027
- Sreekanth, D., Rameshbabu, N. (2012). Development and characterization of MgO/hydroxyapatite composite coating on AZ31 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation coupled with electrophoretic deposition, *Materials Letters*, 68, 439–442
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., Dias, G. (2006). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review, *Biomaterials*, 27, 1728–1734.
- Sun, J., Zhu, Y., Meng, L., Chen, P., Shi, T., Liu, X., Zheng, Y. (2016). “Electrophoretic deposition of colloidal particles on Mg with cytocompatibility, antibacterial performance, and corrosion resistance”, *ACTA BIOMATERIALIA*, 45, 387–398
- Virtanen, S. (2011). Biodegradable Mg and Mg alloys: corrosion and biocompatibility. *Materials Science and Engineering: B*. 176, 1600-1608.
- Wen, C. (2015). *Surface Coating and Modification of Metallic Biomaterials*, Woodhead Publ., Cambridge, UK

## **Investigation of The Effect of The Sintering Temperature on The Microstructure of The Go/Hap Composite Film Electrophoretically Deposited on The Mg-AZ31 Alloy Surface**

### **Extended abstract**

*Magnesium is an element found in a certain proportion in the human body and most of it is stored in the bone tissue. Using as a biomaterial is of great interest due to its contribution to bone development, its superior biocompatibility, low toxicity in the body and can be removed naturally from the body. In addition, the most striking feature of magnesium as a biomaterial is that it is ability to substitute calcium in hydroxyapatite crystals in bone tissue, thus helping bone growth. The fact that magnesium and its alloys have a lower modulus of elasticity than other alloys used as implant materials makes it attractive for use as an implant material. However, previous studies showed that, when Mg and its alloys exposed to the corrosive environment of the body fluid, it showed low corrosion resistance, rapidly corroded and cause to hydrogen gas release while supporting the bone growth. The use of magnesium and its alloys as permanent implant material has limited due to these undesirable features. They are mostly preferred in the applications of the temporary implants. Nowadays, in order to increase the corrosion and wear resistance, protective coating films are applied on the surface of the biomaterials.*

*When the previous electrophoretic coating studies based on to increase the use of Mg alloys as a biomedical permanent implant material is studied, it is observed that in a lot of studies, sintering step has not applied after electrophoretic deposition and a little number researcher has sintered at low temperatures. In this study, Mg-AZ 31 alloy was coated with GO / HAp composite by electrophoretic method. Effect of various sintering temperatures on the microstructure of the deposited films on the alloy*

*was investigated. As a result of the studies; it was seen that coated Mg alloy was sintered successfully at 450 C temperature without any structural deterioration. By increasing sintering temperature, the number and the diameters of the pores was decreased and thus more homogeneous coating structure was formed. This result is consistent with the literature data. It is known that the cracks formed in the coating structure after the electrophoretic method are an undesirable feature which affects the quality of the coating. Thanks to grain growth which was formed as a result of high sintering temperatures, the number of the cracks was found very low for high temperature sintered coatings compared to low temperature sintered samples. Future studies should be focused on the optimizing the process parameters in order to obtain a film structure with more homogenous and less porosity.*

**Keywords:** Mg-AZ31, Electrophoretic, Sintering, Graphene Oxide, Hydroxyapatite



# Mikroalaşımli Hardox 400 Çelik Yüzeyinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemiyle Alaşımlandırılması ve İncelenmesi

**Ali Kaya GÜR**

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye  
[akgur@firat.edu.tr](mailto:akgur@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6077-1892

**Muhammet Hulusi CENGİZ**

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye  
[mhcngz@hotmail.com](mailto:mhcngz@hotmail.com) ORCID: 0000-0001-8456-8047

**Semih TAŞKAYA\***

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 23119, Elazığ/Türkiye  
[muh.semihtaskaya@gmail.com](mailto:muh.semihtaskaya@gmail.com) ORCID: 0000-0003-1524-4537, Tel: 0 537 560 29 63

Geliş: 20.02.2019, Revizyon: 22.04.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

## Öz

Bu çalışmada, mikroalaşımli Hardox 400 çeliğin yüzeyi, Plazma Transfer Ark (PTA) kaynak yöntemi kullanılarak FeCrC, SiC, TiC ve B<sub>4</sub>C tozları ile alaşımlandırılmıştır. PTA kaynak yöntemiyle yapılan yüzey alaşımlama işleminde ilave tozların mikroalaşımli Hardox 400 çelik üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Alaşımlanan numunelerin kaplama tabakalarının mikroyapıları, Hv cinsinden sertlik değerleri, SEM, EDS ve XRD analizleri incelenmiştir. Yapılan bu incelemeler sonucunda; yüzey kaplama için kullanılan tozlarının tamamı, PTA kaynağı enerjisi sayesinde ergidiği için katılma sonrası mikroyapılarda FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>(C, B), Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub>, M(Cr,Fe)<sub>7-23</sub>, (C,B)<sub>3-6</sub>, Cr<sub>3</sub>(C,B) fazlarının oluştuğu görülmüştür. Ayrıca kaplama tabakası ile alt tabakanın metalürjik olarak bir bağ meydana getirdiği gözlemlenmiştir. FeCrC, SiC, TiC ve B<sub>4</sub>C tozları ile kaplanan yüzeylerde sertlik değerlerinde büyük bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** B<sub>4</sub>C; FeCrC; Plazma Transferli Ark; SiC; TiC; Yüzey Alaşımlama

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Plazma Transfer Ark (PTA) kaynak kaplama işlemi, aşınmaya maruz kalan mekanik iş parçalarının yüzeylerini süper alaşım metal tozlarıyla kaplamak için kullanılan uygun bir eritme kaynağıdır. Bu eritme kaynak yöntemi, kaplanmış yüzeylerin sertliğini ve aşınma direncini arttırdığı için otomotiv, denizcilik ve petrokimya endüstrisi gibi pek çok alanda tercih edilmektedir.

PTA işlemi, tüketilemeyen bir tungsten elektrotu (-) ile bakır plazma nozülü (+) arasında kaynak torçu (pilot ark) ile oluşturulan arkın, argon gazının iyonlaştırılmasıyla elde edilen yüksek yoğunluklu bir plazma arkını karakterize eder (Commersald, 2019). Bu yüzden, plazma ark kaynağı (PAW), tungsten atıl gaz kaynağı (TIG) ve gaz metal ark kaynağı (GMAW) gibi diğer genel ark kaynağı teknolojilerinden daha yüksek ark sıcaklığı, ark hızı ve güç yoğunluğu teknolojisine sahiptir (Li ve ark., 2019). Bu teknoloji, PTA işlemi ile alaşımların yüzeylerini farklı tozlar ile alaşımlandırmada uygun hale getirmiştir.

Bilindiği gibi alaşım, metallerin eriyene kadar ısıtılması ve metale arzu edilen özelliklerin kazandırılması için eriyik içerisine farklı alaşım elementlerinin ilave edilmesi ve kalıplanmasıyla elde edilir. Oluşan alaşım en az iki elementin bir kombinasyonudur. Alaşımlarda, tipik olarak, birincil bileşen önce eritilir ve daha sonra diğer alaşımlar buna eklenir (Eoncoat Llc, 2019). Ancak elde edilen alaşımda hala arzu edilemeyen bir takım özellikler olabilir. Bu özellikler alaşım üzerine PTA işlemi ile kaplama yapılarak sağlanabilir. Kaplama işleminde farklı malzemeler kullanılmaktadır.

Bor Karbür ( $B_4C$ ), çok sert bir malzeme (Mohs sertliği >9) olduğu için kaplamalarda tercih nedenidir.  $B_4C$ , Elmas ve kübik bor nitrürün arasında bilinen en sert malzemelerden biridir. Yüksek sertliği, aşınma direnci, kırılma tokluğu, kimyasal kararlılık ve nötron emici gibi özelliklere sahiptir (Çelik ve Kilickap, 2019). Bor Karbür tozları reaksiyona bağlı, sıcak preslenmiş veya sinterlenmiş seramik

uygulamaları için kullanılabilir. Bu nedenle aşınma parçaları, gövde ve araç zırhı gibi endüstriyel parçalar için çok uygundur (Paradyne Lnc, 2019). Zhang ve ark., çalışmalarında farklı  $B_4C$  içerikli  $MoSi_2-B_4C$  kaplamalarını Nb alaşımını üzerinde kıvılcım plazma sinterleme (SPS) işlemi ile hazırlamışlardır. Kaplamada başlangıç malzemeleri olarak Mo, Si ve  $B_4C$ 'nin toz karışımlarını kullanılmışlardır.  $MoSi_2$  ve  $B_4C$  fazlarının yanı sıra, sinterleme sırasında Mo, Si ve  $B_4C$  tozlarının reaksiyonlarından dolayı kaplamalarda az miktarda SiC ve MoB de bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca  $MoSi_2-B_4C$  kaplamaların mikroyapı gelişimi ve oksidasyon davranışları tartışılmışlardır (Zhang ve ark., 2018). Li ve ark., çeşitli  $B_4C$  partikül içeriğine sahip tavllanmış 2.8 mm kalınlıkta  $B_4C/6061Al$  kompozit malzemeleri (ağırlıkça % 15, 20, 25 ve 30), 1000 rpm'lik dönme ve 50-150 mm/dk'luk ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirmişlerdir. Kaynaklı bağlantılardaki sertliğin,  $B_4C$  içeriğinden etkilenmediğini, fakat kaynak hızlarından yüksek oranda etkilendiğini belirtmişlerdir (Li ve ark., 2018).

Farklı malzemeler ile ilgili yapılan çalışmalarda; Deng ve ark., aşınmaya dayanıklı bir Fe-Mo kaplamayı, öncü malzeme olarak saf Mo tozları kullanılarak -PTA işlemi ile AISI 1045 çelik yüzeyi üzerine kaplamışlardır. Kaplamanın mikroyapı, mikro sertlik ve aşınma direnci üzerine etkilerini enerji dağıtıcı spektrum (EDS), X-ışını difraksiyonu (XRD), Vickers sertliği ve disk üzerinde pim aşınma test cihazları ile elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmişlerdir. Kaplamanın, esas olarak hücresele R-Fe63Mo37 dendritlerden ve a-Fess matrisinde düzgün bir şekilde dağılmış az miktarda lamel R-Fe63Mo37 / a-Fess dendritlerinden oluşan hızlı bir şekilde katılmış mikroyapı gösterdiğini bulmuşlardır (Deng ve ark., 2018). Shiwei ve ark., bir ağırlıkça Ti-6wt %Al-4wt %V Ti64 alaşımlı numuneyi ısıtmak için uygulanan bir endüstriyel plazma ark ocağıyla yüzeyel ısı akışı dağılımının belirlenmesi ve uygulanması özetlemişlerdir. Uygulamalarını, endüstriyel

ölçekli bir plazma ark ocağı içinde gerçekleştirmişler ve numuneyi üst yüzeyin altına yerleştirerek 15 termokupl ile donatmışlardır. Numuneyi 278 saniye ısıtarak belli bir zaman aralığında sıvı havuzunun oluşmasını sağlamışlardır. Çalışma sonunda, ısı akısı dağılımından, genel olarak % 28'lik bir ısı transfer etkinliğini hesaplamışlardır (Shiwei ve ark., 2018). Naik ve ark., iş parçası malzemesi olarak çok yüksek dirençli çelik olan Hardox 400'ü kullanmışlardır. Plazma ark kesme işlemi sırasında kesme akımı, besleme gazı basıncı, kesme hızı ve Standoff mesafesi gibi parametreleri değiştirerek kesme kalitesini arttırmaya çalışmışlardır. Ayrıca en uygun kesme koşullarını bulmak için Taguchi analizi ile gözlem yapılmışlardır. Araştırma sonuçlarında; belirli girdi işlem parametresi aralığının gelişmiş işlenebilirliği sağladığını vurgulamışlardır (Naik ve ark., 2018). Frydman ve Pękalski çalışmalarında, kaynaklı Hardox 400 ve Hardox 500 çeliklerinin ısı etkisi altındaki bölgelerini ve bu bölgelerdeki sertlik değişimini incelemişlerdir. Bu çeliklerin ITAB bölgelerinde aşına direnci düşük olduğu gözlemlenmiştir. (Frydman ve Pękalski, 2008).

Bu çalışmada, PTA kaynak kaplama yöntemiyle, mikroalaşımli Hardox 400 çeliğin yüzeyi FeCrC, SiC, TiC ve B4C tozları kullanılarak alaşımlandırılmıştır. PTA yardımıyla sabit enerji girdisinde ve sabit işlem hızı hız değerleriyle oluşturulan kaplama tabakası koruyucu gaz atmosferinde uygulanmıştır. Oluşturulan bu tabakanın ve mikroalaşımli Hardox 400 çeliğin ara yüzeyi ve kaplama tabakası optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD analizleriyle incelenmiş ve sertlik dayanımları tespit edilerek karşılaştırılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, yüzey kaplama işlemlerinde altlık malzemesi olarak, 10 mm x 10 mm x 100 mm boyutlarındaki mikroalaşımli Hardox 400 çeliğinden yararlanılmıştır. PTA kaynak kaplama yöntemi yapılmadan önce çelik numunelerin yüzeylerine parmak freze çakısıyla

1 mm derinliğinde ve 4 mm genişliğinde kanallar açılmıştır. Kanal açma işlemi tamamlanan numuneler aseton ile temizlenerek kurutulmuştur. Kurutulan yüzeylere kaplama malzemesi olarak SiC, B<sub>4</sub>C ve TiC gibi seramik tozları ile FeCrC alaşım tozu ilave edilmiştir. Deneysel altlık malzemesi olarak kullanılan Hardox 400 alaşım çeliği ile kaplama olarak kullanılan FeCrC alaşım tozunun özellikleri Tablo 1'de, kaplama olarak kullanılan SiC, B<sub>4</sub>C ve TiC seramik tozlarının özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Bu tozlar PTA yöntemi ile karıştırılarak preslenmiştir. Bu işlem esnasında tozların kanallardan uçmaması ve yayılmaması için diğer bir deyişle açılan kanallardaki tozların temas eden yüzeyden uzaklaşmaması için bir miktar Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> bağlayıcı ile kaplama yüzeyinde bekletilip 50 °C sıcaklıkta 30 dk kurutulma işlemi sağlanmıştır (Şekil 1).

Bu işlemden sonra PTA kaynak kaplama işlemiyle mikroalaşımli Hardox 400 çelik malzemenin yüzeyi Şekil 2'de ki gibi Tablo 3 verilen değişkenleri uyum olacak şekilde Fırat Üni. Tekn. Fak., Met. ve Malz. Müh. Bölümü laboratuvarında bulunan Ticari 1 marka PTA kaynak cihazı kullanılarak alaşımlandırılmıştır. Kaplama yapılırken Tablo 4'te ki parametrelerden faydalanılmıştır.

PTA metoduyla uygulanan yüzey kaplama işleminde imalat parametreleri Tablo 3'te gösterilmiştir. PTA kaynak metoduyla yüzey kaplama işlemleri 130 A de uygulanmıştır. Argon koruyucu gazının akışkan hacmi 25 lt/dak. ve plazma gazının akışkan hacmi 0,5 lt/dak olarak belirlenmiştir. PTA kaynak metoduyla uygulanan kaplama malzemesinin makro resmi Şekil 3' de verilmiştir. Kaplama işleminden sonra katılma sonucunda yüzeyde herhangi bir makro çatlak görülmemiştir. Mikroyapı analizleri için kaplama yüzeyinin orta kısmında 10 mm x 10 mm x 10 mm boyutlarında numuneler çıkarılmıştır. (Şekil 4). Metalografik aşamalardan geçirilen kaplama malzemeleri, mikroyapı testleri için Nital (%2 NHO<sub>3</sub> + %98 Etil alkol) çözeltisiyle dağlanmıştır.

Tablo 1. Hardox 400 çelik altlığı ile alaşım tozuna ait özellikler

Alaşım	Yapı Şekli	Kimyasal Bileşim (% ağırlık)										
		Cr	C	B	Ni	Si	Mn	W	P	S	Mo	Fe
Hardox 400	Plaka	0.50	0.15	0.004	0.25	0.70	1.60	-	0.025	0.010	0.25	-
FeCrC	Toz	70.21	12.44	-	-	1.08	-	-	-	-	-	Diğ.

Tablo 2. Seramik tozlara ait özellikler

Seramik Tozlar	Safılık
B <sub>4</sub> C	%99.9
SiC	%99.9
TiC	%99.9

Tablo 3. PTA kaynak metoduyla kaplama işlem parametreleri

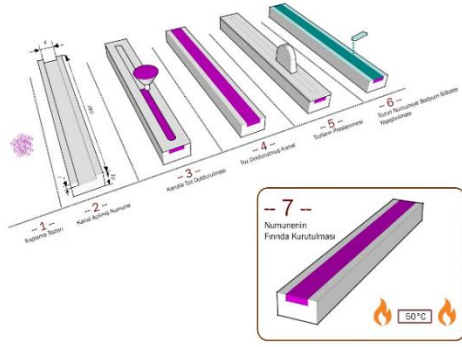
Numuneler	N1	N2	N3	N4
Akım (A)		130		
Gerilim (V)		18		
Koruyucu gaz debisi (m <sup>3</sup> /h)		25		
Plazma gaz debisi (m <sup>3</sup> /h)		0.5, Ar		
Elektrod çapı (mm)		4.7		
Elektrot Türü		% 2 thoryumlu tungsten elektrot		
İlerleme Hızı (m/dak)		0.15		
Torç Malzeme Arası Mesafe (mm)		3~ 4		
Torç Uç Çapı (mm)		3.25		
Set Back (mm)		4		
Isı Girdisi (KJ) Q		9.3		
Enerji Girdisi (KJ) Qw η:0.55		5.115		

Tablo 4. PTA kaynak kaplama numune parametreleri

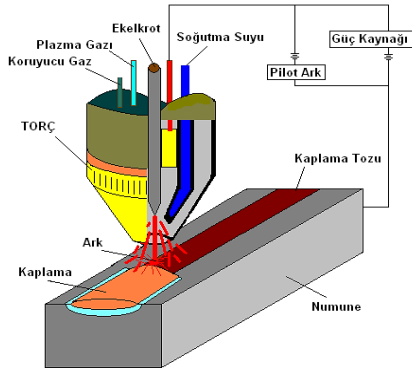
Numune Adı	Kaplanan Toz Oranı (Ağırlıkça % Bileşim)			
	B <sub>4</sub> C	FeCrC	SiC	TiC
N1	70	10	10	10
N2	55	15	15	15
N3	40	20	20	20
N4	25	25	25	25

Mikroyapı testleri için optik mikroskop SEM, bileşik analizleri için XRD ve EDS analizleri uygulanmıştır. Kaplama tabakasının sertlik dayanımları yan kesit yüzeyinin ara tabakasından başlanıp, 100 µm aralıklarla, Fırat Üni. Metalografi Lab. 'ında bulunan Dura schan 20 mikro sertlik cihazından alınmıştır.

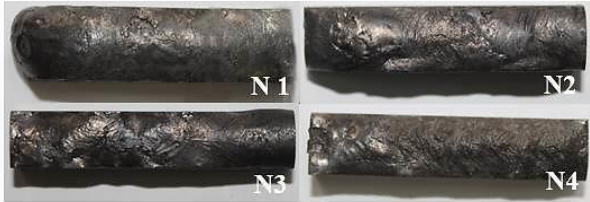
Numuneler N1-N2-N3- ve N4 olarak isimlendirildi. Numunelerin kaplama tabakasında kullanılacak toz karışım oranları Tablo 4 'de verilmiştir. Kaplama tozları ortogonal olarak kendi aralarında miktar olarak değişim göstermektedirler.



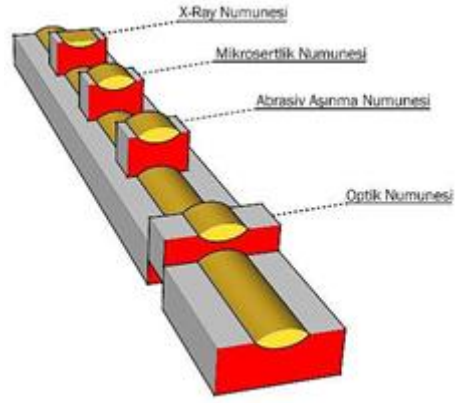
Şekil 1. Kaplama numunesinin kaynak işleme hazırlanması



Şekil 2. PTA kaynağı ile kaplama yönteminin şematik resmi (Gür ve Yıldız, 2008)



Şekil 3. Kaplama yapılmış numunelerin makro resimleri



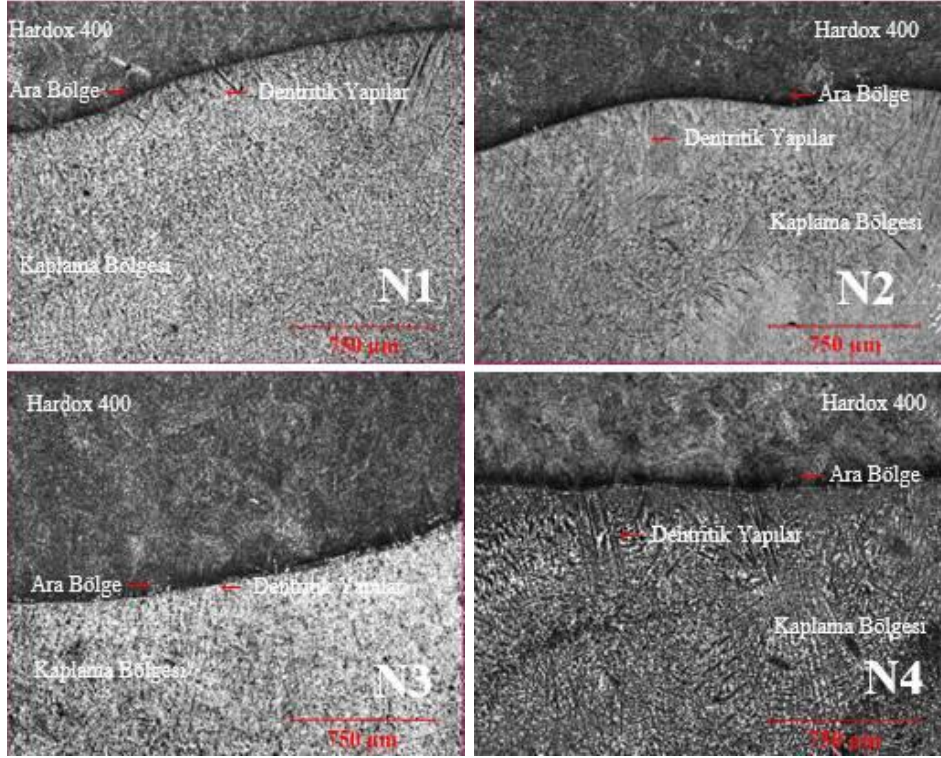
Şekil 4. İnceleme numunelerinin çıkarılışı

## Bulgular ve Tartışma

PTA metoduyla alaşımlandırılmış mikroalaşımli Hardox 400 çelik yüzeyi üzerinde oluşan kaplama tabakalarının mikroyapısı Şekil 8’de verilmiştir. Kaplama tabakalarının kalınlığı  $1.4 \pm 0.7$  mm’dir. Kaplama tabakası ile alt tabaka geçiş yapılarında dentritik katılaşmalar oluşmuştur. Katılaşma konumu kaplamanın alt tabakasında ara yüzeyine dik yöndedir.

PTA kaynak alaşımlama yönteminde verilen enerji oldukça yüksektir. Dolayısıyla verilen yüksek enerji girdisiyle kaplama tozları çözünerek, ergiyik havuz içerisinde katılaşma esnasında karbürler ve yeni bir faz meydana getirerek katılaşır. İşlem sırasında metal toz taneciklerin çözünmesi için uygun zaman ve sıcaklık olmadığında, taneler ergiyik havuz kısmında çözünmeden yapı içerisinde blok şeklinde katılaşır (Wang ve ark., 2005). Şekil 5’te verildiği gibi,  $B_4C$  karbürü ve diğer metal tozları ile elde edilen kaplama tabakalarında, bütünü çözünerek yapıda homojen olarak katılaşma gerçekleşmiştir.



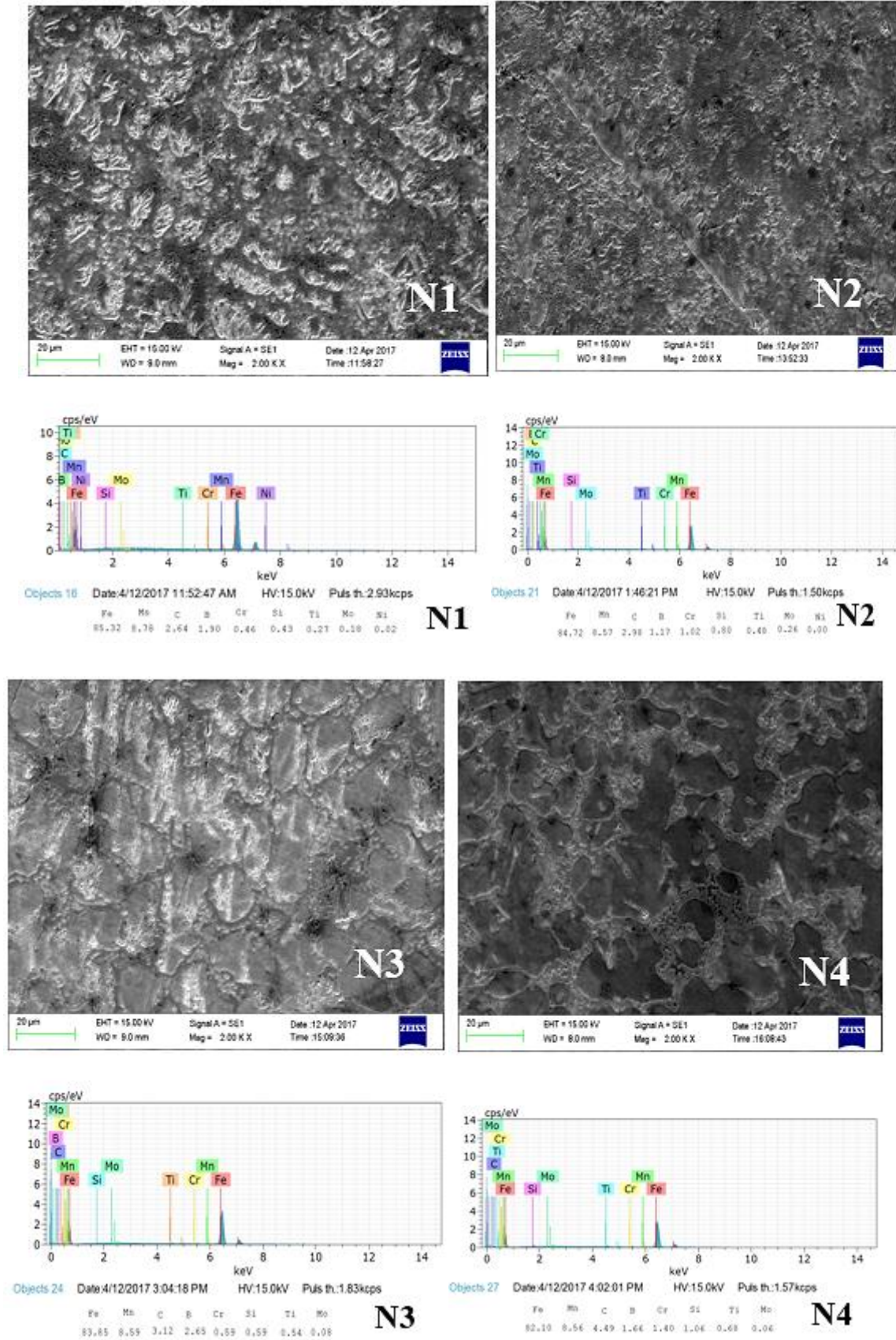


Şekil 5.  $B_4C$  toz karışımıyla oluşan kompozit kaplama / alt tabaka ara yüzeyinin optik görünüşleri

Üst yüzey bölgesine doğru gidildikçe kaplama tabakasının dentritik yapısı yerini martenzitik yapıya sahip fazların oluşmasına bırakmıştır.

PTA kaplama tabakasının oval bir şekil aldığı maksimum nüfuziyetin ortada belirginleştiği, kenar kısımlarına ise kalınlığın inceldiği görülmüştür. Bunun sebebi, enerji fazlalığının elektrod ucuna dik olan doğrultuda çok yoğun şekilde gelmesidir. Kaplama tabakalarından alınan genel EDS verileri göre N1 numaralı bileşime sahip yapıda Şekil 6 (N1)'de görüldüğü üzere dentritik yapılar meydana gelmiş numune B ve C elementlerini bünyesine alarak katılaşma oluşturmuştur. Şekil 6 (N2)'de dentritler arası ötektik matriste katılaşan fazlar

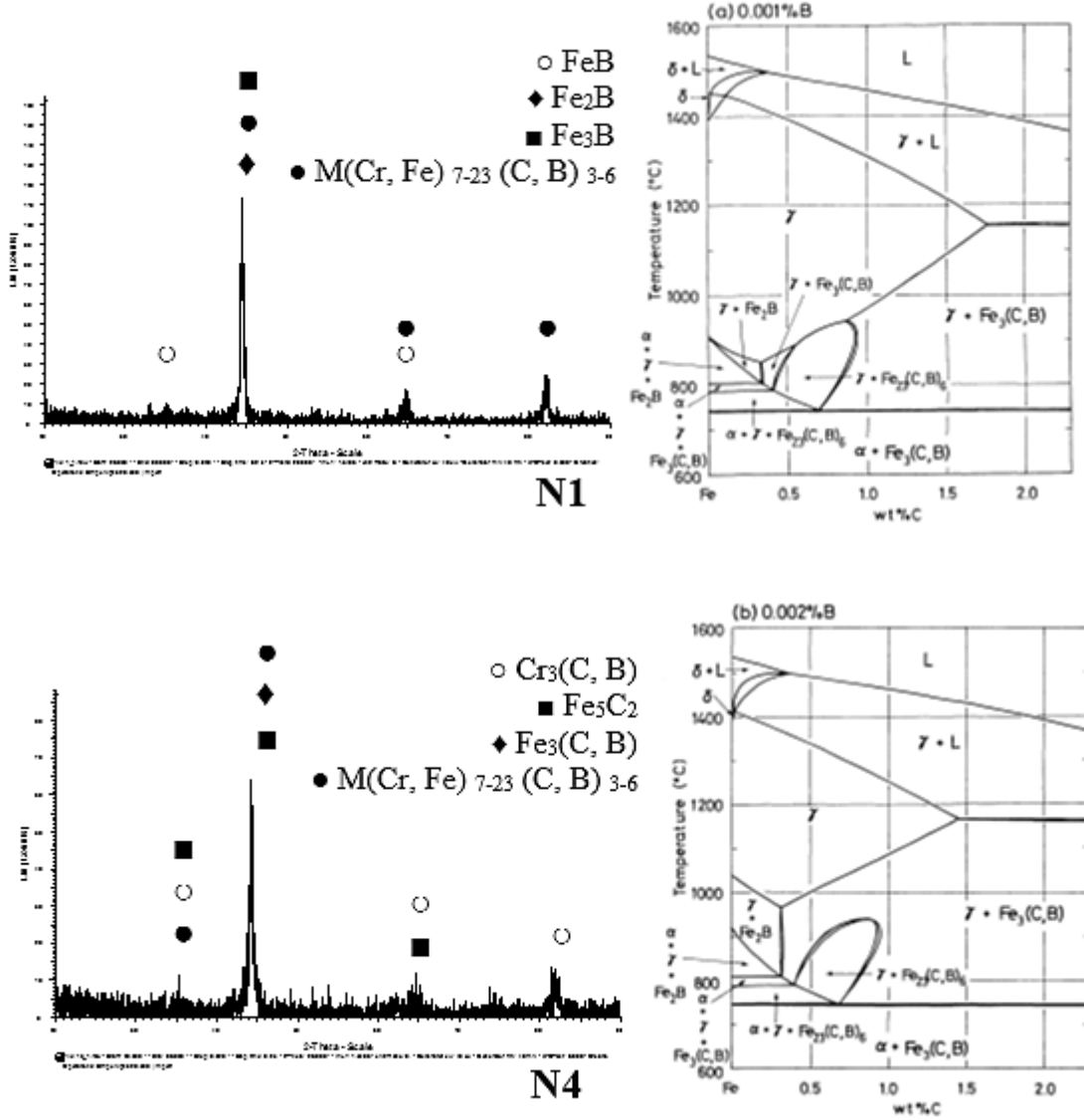
yapı kısmında belirtildiği gibi yoğundur. Katılaşma işlemi sonrasında katılaşma, dentit kolları şeklinde ana tabakadan yüzeye doğru ikincil ve az da olsa üçüncül dentritleri oluşturarak devam etmiştir. Şekil 6 (N3)'te oluşan yine dentritik bir katılaşma meydana gelirken tanelerin daha da büyüdüğü görülmektedir. Şekil 6 (N4)'te meydana gelen fazlar,  $B_4C$  oranındaki azalmasıyla birlikte dentrit kollarında daralma ve nisbeten daha büyük taneler ile katılaşma meydana gelmiştir. Yapıda bulunan karbürler ötektik yapı içinde dağılmıştır.



Şekil 6. Numunelerin kaplama tabakasının SEM ve EDS analizleri

Şekil 7'de, N1 ve N4 numaralı malzemelerin kaplama tabakalarından alınan XRD analizleri, kaplama tabakasında FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>(C,B), M(Cr,Fe)<sub>7-23</sub>(C,B)<sub>3-6</sub>, Cr<sub>3</sub>(C,B), Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub> fazları varlığını göstermektedir. Numunelerin kaplama

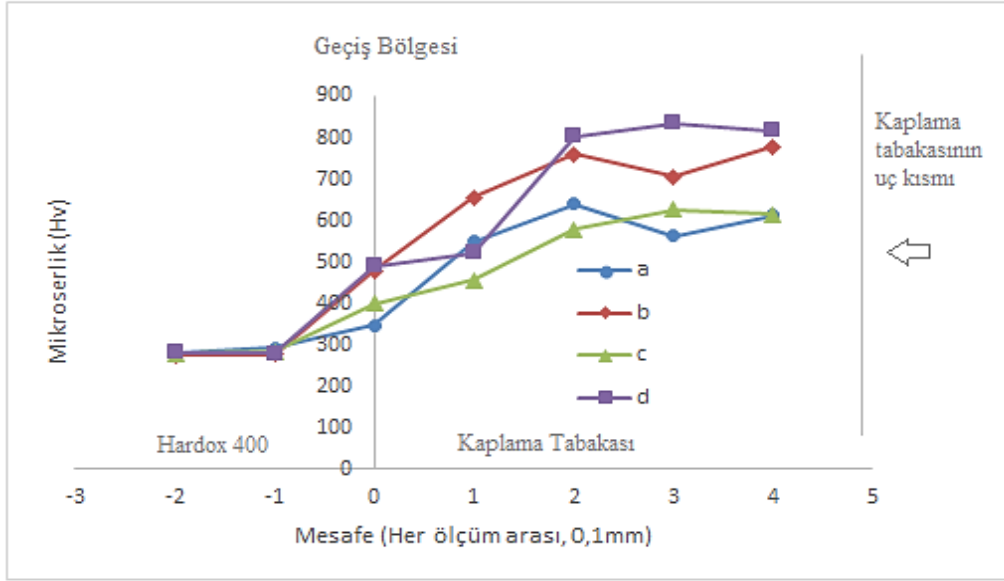
tabakalarından alınan Hv sertlik ortalamaları N1:591, N2:725, N3:570 ve N4:744 Hv değerlerinde çıkmıştır.



Şekil 7. N1 ve N4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi ve Fe-C-B üçlü faz diyagramı.

Yüksek enerji girdisine sahip PTA kaynak kaplama yönteminde kaplama tabakasında oluşan ve mikroyapılarda görünen karbürlerin varlığıyla sertlik değerleri artmıştır. Sertlik değerlerinin yüksek olmasında, oluşan sert

fazların etkili olduğu görülmektedir. Ayrıca FeCrC, SiC, TiC ve B<sub>4</sub>C, kaynak havuzunda karbür bağlanma gücü fazla olan Cr ile yoğun bir karbür tabakası meydana getirmektedir. B<sub>4</sub>C ilavesiyle bu yapının daha fazla yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 8. Mikrosertlik değerleri

Şekil 8’de verilen Hv sertlik değerleri geçiş bölgesinden itibaren hızlı bir artış göstermektedir. Kaplama tabakasında oluşan ve XRD analizleriyle de tespit edilen sert karbür ve fazlar bu artışa sebep olmuştur. Geçiş bölgesinden yaklaşık 0.2 mm uzaklıktan itibaren sertlik 550–850 Hv ölçüm değerlerine kadar ulaşmıştır (Li ve ark., 2006). Kaplama tabakasında meydana gelen metalik ve karbür yapıların homojen dağılması sebebiyle, tabakada meydana gelen sertlik dağılımları tamamen dengeli bir hal almıştır.

## Sonuçlar

Plazma Transfer Ark (PTA) kaynak kaplama yöntemiyle mikroalaşımli Hardox 400 çelik yüzeyinde FeCrC TiC, SiC ve B<sub>4</sub>C tozları başarılı olarak ergitilmiştir. Kaplama tabakasının makroyapısına göre hiçbir mikro ve makro çatlak oluşmamıştır. Yüzey kaplama için uygulanan FeCrC TiC, SiC ve B<sub>4</sub>C tozlarının hepsi PTA kaynağı enerjisi sonucunda ergitilerek katılma sonrası mikroyapıda FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>(C, B), Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub>, M(Cr,Fe)<sub>7-23</sub>, (C,B)<sub>3-6</sub>, Cr<sub>3</sub>(C,B) fazları oluşmuştur. Altlık malzemesinin sertliği 280 Hv iken oluşan karbürlerin sertliği maksimum 836 Hv ölçümleriyle N4 numaralı malzemede

incelenmiştir. Sertlik ölçümlerinin bu kadar fazla yükselmesinde kaplama tozunda var olan karbür oluşturuç tozların katılmasıyla kaplama tabakasında meydana gelen MC ve FeB, Fe<sub>3</sub>(C, B), Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub> (Gür, 2013; Yıldız ve Gür, 2011; Gür vd., 2014; Gürgeç ve Özel, 2016) bileşiklerinin oluşumu bu durumu oluşturmuştur. Sonuçta; Hardox 400 çeliğinin alt tabakaya göre kaplama tabakasındaki sertliğin daha yüksek olduğu incelenmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) TEKF-16.22 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- CommersaldS.P.A., <https://www.commersald.com/the-pta-process-plasma-transferred-arc.htm> , (10 Ocak 2019)
- Çelik, Y.H., Kilickap, E., (2019). Hardness and wear behaviours of Al matrix composites and hybrid composites reinforced with B<sub>4</sub>C and SiC, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57(9-10), 613-622.
- Deng, X., Zhang, G., Wang, T., Ren, S., Bai, Z., Cao, Q., (2018). Investigations on microstructure and wear resistance of Fe-Mo alloy coating fabricated by plasma transferred

- arc cladding, *Surface and Coatings Technology*, 350, 480-487.
- Eoncoat Llc, <https://eoncoat.com/what-is-alloying/> , (10 Ocak 2019)
- Frydman, S., Pękalski, G, (2008). Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels. *Archives of civil and mechanical engineering*, 8(4), 15-27.
- Gur, A. K., Ozay, C., Orhan, A., Buytoz, S., Caligulu, U., Yigitturk, N., (2014). Wear Properties of Fe-Cr-C and B<sub>4</sub>C Powder Coating on AISI 316 Stainless Steel Analyzed by the Taguchi Method. *Materials Testing*, 56 (5), 393-398.
- Gur, A.K., (2013). Investigating the wear behaviour of FeCrC/B<sub>4</sub>C powder alloys coating produced by plasma transferred arc weld surfacing using the Taguchi method. *Materials Testing*, 55 (6), 462-467.
- Gürgeç, T., and Özel C., (2016). Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of FeCrC, FeB and FeW Alloys Coated AISI 1020 Steel Using PTA Method. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 28 (2).
- Gür, A.K., Yildiz, T, (2008). The Effect at Wear Behavior Of Coating Layer of Proportion Gases N<sub>2</sub> , *e-Journal of New World Sciences Academy*, 3(4),627-635.
- Ji, S., Duan, J., Yao, L., Maijer, D. M., Cockcroft, S. L., Fiore, D., Tripp, D.W, (2018). Quantification of the heat transfer during the plasma arc re-melting of titanium alloys, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 119, 271-281.
- Kumar Naik, D., Maity, K.P, (2018). An optimization and experimental analysis of plasma arc cutting of Hardox-400 using Taguchi based desirability analysis, *Materials Today: Proceedings*, 5, 13157–13165.
- Liu, Y.F., Han, J.M., Li, R.H., Li, W.J., Xu, X.Y., Wang, J.H. and Yang, S.Z., (2006). Microstructure and dry-sliding wear resistance of PTA clad (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>/γ-Fe ceramal composite coating, *Applied Surface Science*, 252 (20), 7539-7544.
- Li, Y. Z., Wang, Q. Z., Xiao, B. L., Ma, Z. Y, (2018). Effect of welding parameters and B<sub>4</sub>C contents on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded B<sub>4</sub>C/6061Al joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 251, 305-316.
- Li, Yan, Ling, Wang, Chuansong, Wu, (2019). A novel unified model of keyhole plasma arc welding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 133, 885-894.
- PanadyneInc, <http://www.panadyne.com/boroncarbidepowders.html>, (10 Ocak 2019)
- Zhang, P., Chen, C., Chen, Z., Ren, X., Shen, C., Feng, P, (2018). Reaction synthesis of spark plasma sintered MoSi<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C coatings for oxidation protection of Nb alloy. *Ceramics International*, 45(4), 4290-4297.
- Wang Xibao, Wang Xiaofeng, Shi Zhongquan, (2005). The composite Fe-Ti-B-C Coatings by PTA powder surfacing process, *Surface and Coatings Technology*, 192 (2-3), 257-262.
- Yildiz, T., Gür,A., (2011). Microstructural characteristic of N<sub>2</sub> shielding gas in coating FeCrC composite to the surface of AISI 1030 steel with PTA method, *Archives of Metallurgy and Materials*, 56(3), 723-729.

## **Alloying and Investigation of Microalloyed Hardox 400 Steel Surface by Plasma Transfer Arc Welding Method**

### **Extended abstract**

*In this study, the surface of the microalloyed Hardox 400 steel is alloyed with FeCrC, SiC, TiC and B<sub>4</sub>C powders using Plasma Transfer Arc welding method. The effect of the additional powders on the microalloyed Hardox 400 steel was investigated in the surface alloying process by PTA welding method. Coating layers of the alloyed samples; microstructure, SEM, EDS, XRD and Hv hardness were examined. As a result of these investigations, it was observed that the coating layer and the substrate produced a metallurgical bond and a significant increase in the hardness values was observed in the presence of FeCrC, SiC, TiC and B<sub>4</sub>C powders. FeCrC, TiC, SiC and B<sub>4</sub>C powders used for surface coating were all melted by PTA source energy and microstructure FeB, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>(C,B), Fe<sub>5</sub>C<sub>2</sub>, M(Cr,Fe)<sub>7-23</sub>, (C,B)<sub>3-6</sub>, Cr<sub>3</sub>(C,B) phases were formed after solidification. In this study, 10 mm x10 mm x100 mm micro-alloy Hardox 400 steel was used as the base material for surface coating operations. Before the PTA welding coating method, channels were opened on the sample surfaces with a 1 mm deep and 4 mm wide finger milling machine. Afterwards, the surfaces of the sample and channels were cleaned and cleaned with acetone. The coating is pressed into the channel.*

*In the PTA welding alloying process, in order to prevent the dusts from flying from the channels, the powder is kept on the surface of the coating with a Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> binder and dried for 30 minutes at 50 °C in order to prevent the dusts from flying through the channels.*

*A macro picture of the coating material made by PTA welding method is given in Figure 3. As a result of solidification after coating, no macro cracks were observed on the surface. For microstructure investigations 10 mm x 10 mm x 10 mm samples were removed from the middle of the coating material. The coating materials, which are metallographic processes, are etched with Nital (2% NHO<sub>3</sub> + 98% Ethyl alcohol) solution for microstructure investigations.*

*For microstructure tests, optical microscope SEM was applied for XRD and EDS analysis for compound analysis.*

*The thickness of the coating layers is  $1.4 \pm 0.7$ mm. Dendritic solids were formed in the coating layer and the substrate transition structures. The solidification position is perpendicular to the interface in the lower layer of the coating. The energy supplied by the PTA welding alloying method is very high. Thus, the powder of the coating dissolves by means of the high energy input, and the melt solidifies by forming a new phase and carbides during solidification in the pool.*

*As the surface of the covering layer was moved towards the upper surface area, the dendritic structure was left to form martensitic phases. When the PTA coating layer has an oval shape, the max. it is observed that penetration has become apparent in the middle and the thickness has decreased in the edge regions. After solidification, solidification continued as secondary dendrites in the form of dendrite arms, forming a secondary and a few tertiary dendrites.*

*In the PTA welding coating method with high energy input, hardness values increased with the presence of carbides in the coating layer and appearing in microstructures. In the high hardness values, the formation of the hard phases formed was effective. In addition, FeCrC, SiC, TiC and B<sub>4</sub>C, the source pool with a high carbide binding strength chromium is formed with a dense carbide layer.*

*Plasma Transfer Arc (PTA) welding method has successfully melted FeCrC TiC, SiC and B<sub>4</sub>C powders on the Hardox 400 steel surface. According to the macro structure of the coating layer, no micro and macro cracks were formed.*

**Keywords:** B<sub>4</sub>C; FeCrC; Plasma Transfer Arc; SiC; tic; Surface Alloying



# 85/15 Bronz Kompozitinde Ni İlavesinin Üretim Parametrelerinde Elektriksel İletkenliğe Etkisi

**Tülay YILDIZ**

Fırat Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[tyildiz@firat.edu.tr](mailto:tyildiz@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-9665-7733, Tel: (424) 237 00 00 (4239)

**Ali Kaya GÜR\***

Fırat Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[akgur@firat.edu.tr](mailto:akgur@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0001-6077-1892, Tel: (424) 237 00 00 (4249)

**Nafiz BOZKURT**

Fırat Üniversitesi, Metal Eğitimi ABD, Elazığ  
[nafizbozkurt@gmail.com](mailto:nafizbozkurt@gmail.com) ORCID: 0000-0002-9071-5813

Geliş: 08.03.2019, Revizyon: 30.04.2019 , Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

*Bu çalışmada %3 Ni takviyeli CuSn (85/15) Bronz alaşımının elektrik iletkenliğine sinterleme sıcaklığı ve sinterleme basıncının etkisi incelenmiştir. Bu amaçla toz metalürjisi sıcak presleme yöntemi ile CuSn (85/15) bronzuna %3 Ni takviyeli kompozit malzeme üretilmiştir. Çalışma parametreleri olarak, sinterleme sıcaklığı 700 °C ve 800 °C sinterleme süresi 15 dk olmak üzere sabit tutulmuş, sinterleme basıncı ise 20 MPa ve 30 MPa olmak üzere değişken parametreler kullanılmıştır. Sıcak presleme yönteminde sinterleme esnasında ısı ve basıncın aynı anda uygulanması bu metodun en büyük avantajlarından biridir. Dolayısıyla imalat sırasında oluşabilecek boşlukların tamamına yakını giderilmiş olur. Bu sayede daha sıkı kompozit malzeme elde edilir. Üretilen Cu/Sn/Ni kompozit numuneler mikroyapı incelemeleri için hazırlanıp SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Numunelerin mekanik davranışlarının incelenmesi amacı ile numunelerden makrosertlik alınmıştır. Son olarak ise numunelerin elektrik iletkenlik değerleri öziletkenlik ve %IACS değerleri ölçülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** % IACS,, 85/15 bronz, elektriksel iletkenlik

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Toz metalürjisi üretim yöntemlerinden biri olan sıcak presleme yöntemi, yoğunluğu yüksek malzemeleri üretmek için bir veya birden çok parçaya basıncın izostatik olarak uygulanan ve koruyucu gaz ortamı içeren bir yöntemdir (Conway 2004). Yüksek sıcaklık ve basınçta geçen süre; plastik deformasyona, sürtünmeye ve difüzyona neden olur. Gözenekleri ortadan kaldırmak için toz metalürjisi uygulamalarına yönelik parçalara sıcak izostatik presleme işlemi uygulanarak hataların giderilip, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanır. Sıcak izostatik presleme, katı veya toz formunda iki veya daha fazla malzemenin bir arada bağlanmasına veya kaplanmasına olanak sağlar (Ageev, vd. 2015 - Yıldız, vd.2017)

Sıcak presleme yöntemi, özel olarak imal edilmiş bir sistemde yüksek basınç, sıcaklık ve bir gaz atmosferinde (genellikle soy gazlar) basıncın ve sıcaklığın aynı anda uygulanmasını içeren bir toz metalürjisi yöntemidir. Bu yöntemde sinterleme işleminde genellikle argon kullanılır. Yüksek sıcaklık ve basınçtan sonra sistem plastik deformasyona, sürünme ve difüzyona izin verir. Üretilen parçaların içindeki mikro gözenekliliği gidermek, böylece kusurları azaltmak suretiyle mekanik özellikleri iyileştirmek için sıcak presleme yöntemi kullanılır. Sıcak izostatik presleme aynı zamanda iki veya daha fazla malzemenin katı veya toz halinde birleştirilmesini veya kaplamasını sağlar. (Atkinson, vd 1997).

Elektriksel iletkenlik ( $\sigma$ ), bir maddenin elektrik akımını iletme yeteneğini belirleyen fiziksel bir büyüklüktür. Elektrik iletkenliğinin SI standardındaki birimi Siemens/metre (S/m ya da  $\Omega^{-1}.m^{-1}$ ) olup, iletkenlik ( $\sigma$ ) özgül direncin tersine eşittir. İletkenlik değerlerine göre maddeler, iletkenlik değerleri  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de  $\sigma > 106\text{ S/m}$  olanlara iletken maddeler denmektedir. İletken maddelere örnek olarak metaller verilebilir. Tüm metaller içerisinde en iyi iletken olanları saf gümüş ve saf bakırdır (Kaplan, vd. 2011- Çelik Ö. 2009). Elektrik devrelerini açan ve kapatan ve dolayısıyla elektrik akımını açıp kapatan elektrik kontak cihazlarıdır. Ark, düşük

voltaj veya akım seviyesindeki uygulamalar haricinde, özellikle canlı bir devredeki kontakların açılması sırasında büyük bir problem oluşturur. Dolayısıyla ark erozyona ve yüksek ısıdan dolayı kontak yüzeylerinin erimesine ve hatta buharlaşmasına neden olurlar. Bakır esaslı metaller elektrik kontak malzemesi olarak kullanılırlar. İyi elektrik iletkenlik özellikleri termal iletkenlikleri, ucuz olmaları ve imalat kolaylıklarından dolayı tercih edilirler. Ama en önemli avantajları düşük elektriksel dirençleri, oksitlenme ve korozyon dirençleridir. Dolayısıyla bakır esaslı kontak malzemeleri bu tip uygulamalarda oksit filminden kaynaklanan voltaj düşmesi de kabul edilebilir bir değerdedir. En çok kullanılan bakır kontak malzemeleri sarı pirinç (C27000), fosforlu bronz (C51000) ve bakır berilyum (C17200-C71500) alaşımlarıdır. Eritme döküm yöntemiyle üretilirler ve düşük akımlı uygulamalarda şiddetli ark oluşmayan uygulamalarda kullanılırlar (Davis, 2011).

Bu çalışmada, 85Cu/15Sn Bronz alaşımına % ağırlıkça %3 Ni katılarak yeni bir kompozit malzeme üretilmiştir. Sıcak presleme yöntemiyle iki farklı sinterleme sıcaklığı ve presleme basıncında üretilen numunelerin mikroyapı, makrosertlik ve elektrik iletkenlikleri ölçülüp değerlendirilmiştir.

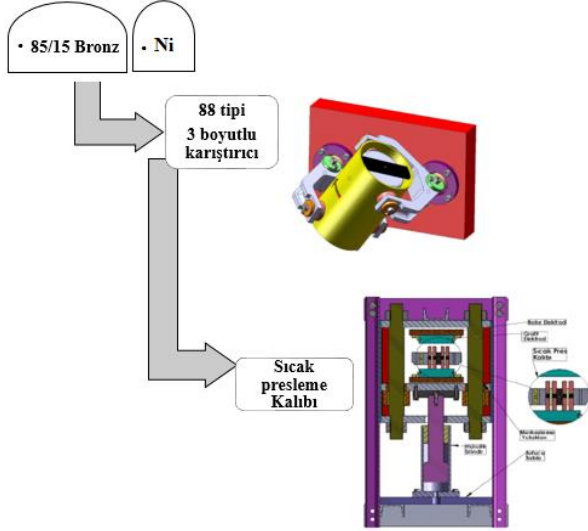
## Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, 85Cu/15Sn Bronz alaşımına Tablo 1'de fiziksel özellikleri verilen tozlar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların boyutları piyasadaki hazır olarak temin edilmiştir. Tablo 2'de % ağırlıkça 85/15 bronz ve Ni tozları karıştırılarak sıcak presleme yöntemi kullanılarak yeni bir kompozit malzeme üretilmiştir. Sinterleme sıcaklığı tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5'i alınarak tespit edilir. Birden fazla bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin ergime sıcaklığının altında, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığı üzerinde seçilir (Klar E, 1984). Üretilen numunelerde literatür çalışmaları doğrultusunda basınç 20-30 MPa,



sinterleme sıcaklığı ise 700-800°C değerlerinde 15 dakika sıcak prese tabi tutulmuştur.

Bu çalışmada, numunelerin üretilmesi için Şekil 1'de akış şeması verilmiştir.



Şekil 1. Yapılan işlemlerin şematik olarak gösterilmesi

- Bu çalışmada kullanılan metal tozlar piyasadan, Tablo 1'de belirtilen tane boyutunda temin edilmiştir. Numunelerin üretimi Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Atölyeleri ve Çel-Mak San. ve Tic. Ltd. Şti. nde Tablo 2 'de verilen üretim parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de belirtilen ağırlıkça katılan %3 Ni oranı (Konstanty 2005) metal tozları Ni karışımları yüksek mukavemet ve uzama özellikleri istenen parçaların üretiminde kullanılır. Metal tozlarına eklenen Ni miktarı ağırlıkça % 2-5 arasında değişebilir.

Tablo 1. Metal Toz Büyüklükleri

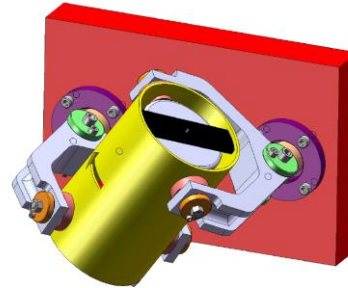
Metal Tozları	Tane Boyutu ( $\mu\text{m}$ )
Bronz (85Cu/15Sn)	70
Nikel	5

Bu çalışmada; 85/15 bronzuna ilave edilecek Ni saf haldeki metal tozlarının birbiriyle iyice karıştırılarak homojen bir yapı oluşturulması amacıyla 88 tipi, kapaklı toz hazneli, 3 boyutlu dönen karıştırma mikseri kullanılmıştır (Şekil 2). Karıştırıcı mikser çalıştırdıktan sonra

içindeki tozların homojen karışabilmesi amacıyla haznesi 360 derece turlarla her yöne dönebilmekte, dolayısıyla tozların birbiriyle iyice karışması sağlanmaktadır. Oransal olarak hazırlanan numuneler, karıştırma ünitesinde 20 dakika süresince karıştırıldı.

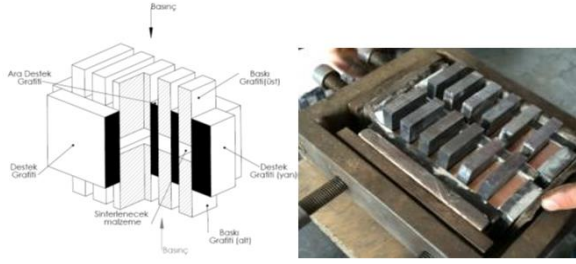
Tablo 2. Numunelerin Üretim Parametreleri

Grup No	Sinterleme Basıncı (MPa)	Sinterleme Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ )	Sinterleme Süresi (dk)	Bronz (%)	Ni (%)
A-I	20	700			
A-II		800	15	97	3
A-III	30	700			
A-IV		800			

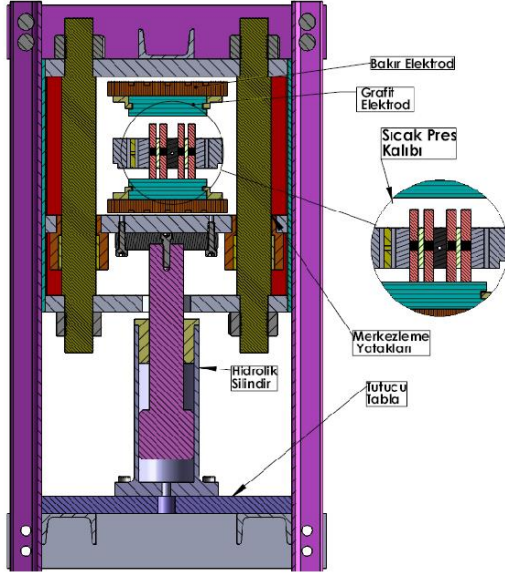


Şekil 2. Mikser tipi üç boyutlu dönebilen toz karıştırıcı

Bu çalışmada, ön preslemesi yapılan numuneler daha önceden hazırlanan grafit kalıplar içerisine alınarak sinterlemeye hazır hale getirildi (Şekil 3). Sinterleme işleminin daha sağlıklı olabilmesi için grafit kalıp yağlayıcı ile yağlandı. Çalışmada kullanılan metal toz karışımının üzerinden elektrik akımı geçirilip numune ısıtılarak basınç altında sinterlenmesi grafit kalıpla yapılmıştır (Şekil 3). Bu kalıp baskı grafiti, ara destek grafiti, yan destek grafiti parçalarından meydana gelmiştir.



Şekil 3. Grafit kalıbın perspektif görünümü ve numunelerin sinterleme kalıbına alınması



Şekil 4. Sıcak pres makinesi (Çelik, 2011)

Sıcak presleme, ısı ve basıncın aynı anda uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Isı ve basıncın aynı anda uygulanması (Şekil 4) ile tüm boşlukların tamamı veya tamamına yakını giderilir. Tüm partiküller arasında oluşacak üniform bir akış ile bağ kuvvetlenir. Sıcak presleme metodu tek aşamalı bir proses olduğundan oldukça hızlıdır ve endüstride yoğun olarak uygulanmaktadır.. Numuneler 10\*10\*40 mm boyutlarında üretildi. Üretilen numunelerin makro görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir. Numunelerin makro görüntüsü incelendiğinde dış yüzeyinin çatlaksız, düzgün, boyutlarının geometrik olarak düzgün bir yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Üretilen Numune Grupları

Metalografik incelemeler için numunelerin yüzeyleri sırasıyla 200, 320, 500, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik zımparalarda temizlendikten sonra 3 µm'lik elmas pasta ile parlatma işleminden geçirilmiştir. Parlatılan numuneler, daha önce hazırlanmış dağlayıcılarda dağlama işlemine tabi tutulmuştur (Tablo 3).

Tablo 3. Dağlayıcı Formülü

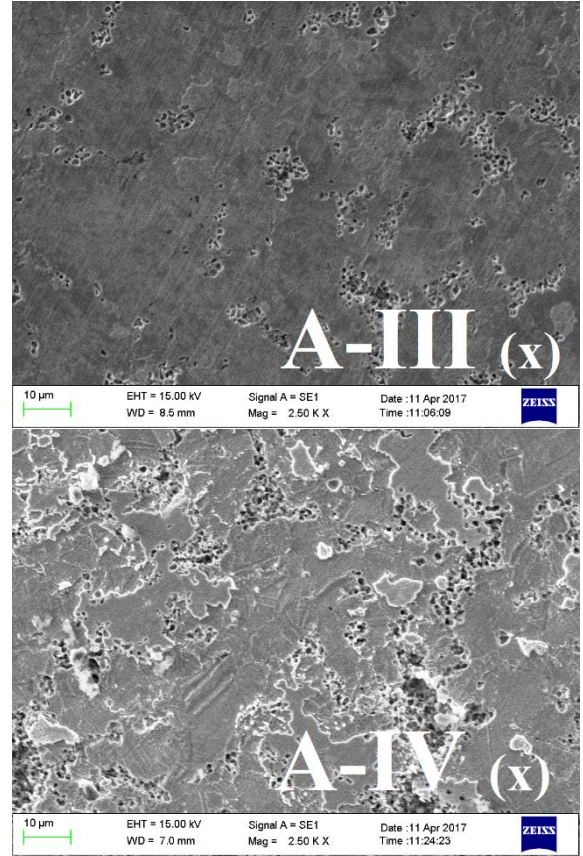
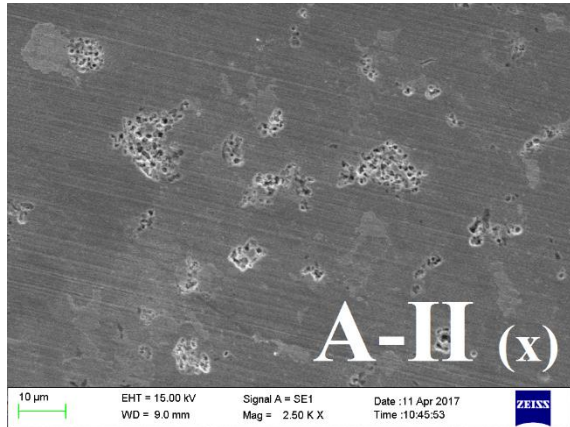
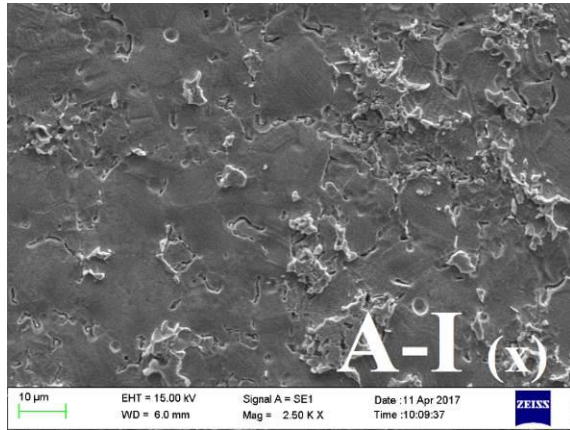
20 ml	HNO <sub>3</sub>
10 ml	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
20 ml	H <sub>2</sub> O

Mikroyapı incelemelerinde SEM ve EDS analizleri için Fırat Üniversitesi Merkez Laboratuvarındaki cihazı kullanılmıştır. Görüntüler x2500 büyütme yapılarak alınmıştır. Numunelerin sertlik ölçümleri ise "Emcotest Dura Scan" marka makro sertlik cihazıyla cihazında 62,5 kg yük ve 2,5 mm çapında bilye ile numunelerin sertliği brinell cinsinden ölçülmüştür. Numunelerin sertlik değerlerinin ölçümleri her bir numunenin bir yüzeyinden 3 tane Brinell sertlik alınarak bu sertliklerin ortalaması Brinell sertlik ölçümü sonucu olarak kullanılmıştır.

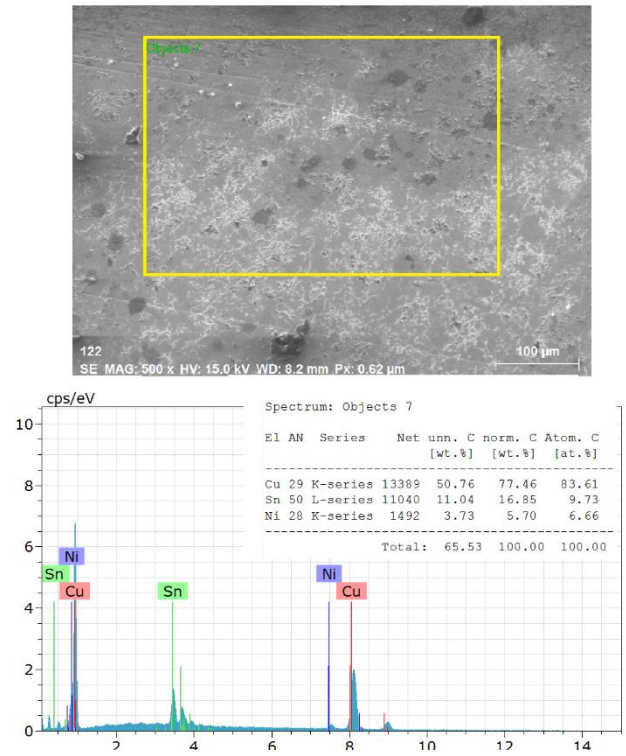
Yoğunluk ölçümleri AD-1653 marka yoğunluk ölçüm kiti ile ölçülmüştür. Numunelerin önce havadaki ağırlığı, daha sonra ise su içerisindeki ağırlıkları ölçülmüştür. Ayrıca numunelerin teorik yoğunlukları da hesaplanarak deneysel yoğunlukla kıyaslanmıştır.

Doğru akımla yapılan iletkenlik ölçümleri için “Keithly 6517A Electrometer” cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz; sıcaklık kontrol cihazı, elektrometre, bilgisayar ve çeşitli elektronik aygıtlardan oluşmaktadır. Elektrometreye bağlı iki elektrot arasına kalınlıkları ölçülerek bırakılan numuneler 5V DC gerilim altında oda sıcaklığında ölçüldü. Alınan bu değerlerden her numune için ayrı ayrı I/V grafikleri çizildi. Elde edilen bu grafikte ayrılan her bir bölgenin eğimi bulunarak ayrı ayrı aktivasyon enerjileri hesaplandı. Elde edilen verilerle elektrik iletkenlikleri belirlendi.

## Bulgular ve Tartışma



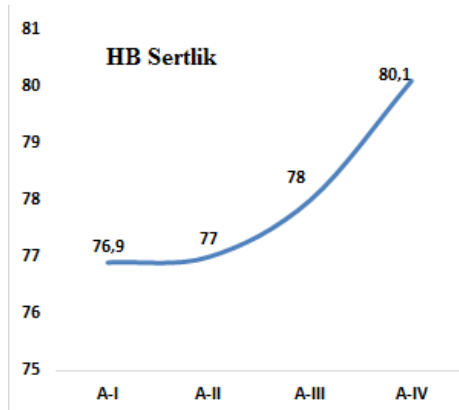
Şekil 6. Numunelere Ait SEM Mikroyapılar



Şekil 7. A-I Numunesine EDS analizi

Şekil 6’da 20 MPa basınçta 700 ve 800 °C ‘de ve 30 MPa basınçta 700 ve 800 °C ‘de üretilen numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7’de A-I numunesine ait EDS analizi yüzey taranarak alınmıştır. Şekil 7 incelendiğinde Cu-Sn-Ni elementlerinin tamamına rastlandığı görülmektedir. Numuneler kıyaslandığında sıcaklığın ve basıncın artmasıyla tane sınırları daha belirginleşmiştir. A4 numunesi sıcaklığın ve basıncın en yüksek olduğu numunedir.

Sıcak presleme yoluyla elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 8’de numunelerin sertlik değerleri grafikleri verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi sinterleme sıcaklığı ve basıncın artmasıyla sertlik değerleri de artmaktadır. En yüksek sertlik değeri sıcaklık ve basıncı yüksek olduğu A4 numunesinde 80.1 HB olarak bulunmuştur.



Şekil 8. Sertlik ölçüm sonuçları (HB)

Sıcak presleme yöntemiyle üretilen numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre hesaplanmıştır. Tablo 4’de deneysel ve teorik yoğunluklar verilmiştir. Tablodanda görüldüğü gibi teorik yoğunluğa en yakın değer, A-IV numunesine ait olduğu görülmüştür.

Tablo 4. Numunelerin Yoğunluk Ölçümleri

	Deneysel yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Teorik yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
A-I	8,793	8,878
A-II	8,797	8,878
A-III	8,798	8,878
A-IV	8,801	8,878

Üretilen kompozit numunelerin öziletkenliğini bulabilmek için ise oda sıcaklığındaki direnç değerleri ölçülmüştür. Bunun için “Keithley 4200-SCS Semiconductor Characterization” marka ölçüm cihazı kullanılarak oda sıcaklığındaki direnç değerleri bulunmuş ve bunlardan; birinci denklem yardımıyla da öziletkenlik elde edilmiştir. Ayrıca numunelerin % IACS (International Annealed Copper Standart) değerleri de hesaplanmıştır. % IACS değeri, tam yoğun tavlanmış saf bakırın öziletkenliğinin % 100 kabul edilmesi ile yapılan iletkenlik ölçüm standardı olup %100 IACS=58 MegaSiemens/metre (MS/m)” dir. Dolayısı ile numunelerin %IACS değerleri; ikinci denklem yardımı ile hesaplanmıştır (Gök, vd. 2011).

$$\sigma = \frac{R \cdot L}{A} \quad \sigma = \left(\frac{I}{V}\right) \cdot \left(\frac{d}{A}\right) \quad A = \pi r^2$$

Bu formülde d= 0.4cm ( iki probe arası mesafe) A=alan( $\pi r^2$ ) R= 0.5mm (Probun çapı) olarak verilmiştir.

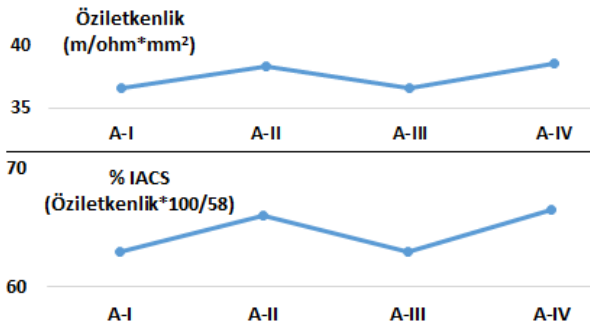
$$\%IACS = \frac{\text{Öziletkenlik} \left(\frac{m}{\Omega \times mm^2}\right) \times 100}{58}$$

Bu denklemde,  $\sigma$  : Öziletkenliği (m /  $\Omega \times mm^2$ ), R: Direnci (ohm), L: Numune kalınlığını (m) ve A: tesir kesit alanını (mm<sup>2</sup>) temsil etmektedir. Formülde verilen değerler yerine yazılarak her bir numunenin iletkenliği hesaplanabilir. I/V değeri grafiğin eğiminden elde edilir ancak referans grafiğindeki I/V’nin eğiminden ayrı ayrı çıkarılması gerekiyor. Şekil 9’da numunelere ait öziletkenlik ve %IACS değerleri grafikleri verilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda sinterleme basıncı ve sıcaklığı arttıkça iletkenlik değerinde de artma gözlenmiştir. Sinterleme ve basınç sonucu metal partiküller arasında oluşacak bağ kuvveti artacağından difüzyon da artacaktır. Bu nedenle artan difüzyon sayesinde metalik bağ kuvvetlenecek ve dolayısıyla iletkenlik değeri de yükselmiş olacaktır. Elde edilen öziletkenlik değerleri ve % IACS değerleri Tablo 5’de sayısal değerleri verilmiştir. % iletkenlik bütün numunelerde %50 değerinin üzerinde çıkmış ve

üretilen kompozitin iletken olarak kullanılmasının herhangi bir sakınca yoktur (agrawalmetal.com, makeitfrom.com, engineersedge.com).

**Tablo 5.** Öziletkenlik ve %IACS değerleri

	Öziletkenlik ( $m/\Omega * mm^2$ )	% IACS (Öziletkenlik*100/58)
A-I	36,557345379654	63,0299
A-II	38,337766009874	66,0996
A-III	36,546787007679	63,0117
A-IV	38,56642793037	66,4938



Şekil 9. Öz İletkenliği ve IACS Grafiği (%)

## Sonuçlar

Sıcak presleme yöntemi ile üretilen 85/15 Bronz ve Ni ilaveli deney numuneleri çok düzgün ve boşluksuz şekilde üretimi gerçekleşmiştir. Bu durum özellikle sıcak presleme yönteminin en önemli avantajlarından. Basınç ve sıcaklığın artmasıyla daha sert, yoğun ve gözeneksiz numuneler elde edilmiştir. Numunelerin tamamı iletkenidir. Ancak Numuneler kıyaslandığında sıcaklık ve basıncın artmasıyla iletkenlik değerinde artış gözlenmiştir. Sinterleme basınç ve sıcaklığının artmasıyla metal partiküller arasında oluşacak bağ kuvveti artacağından difüzyon da artacaktır. Bu nedenle artan difüzyon sayesinde metalik bağ kuvvetlenecek ve dolayısıyla iletkenlik değeri de yükselmiş olmaktadır.

## Teşekkür

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel araştırma Projeleri TEF.17.01 nolu proje tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Ageev S. V. and Girshov V. L., (2015). Hot Isostatic Pressing of Metal Powders, *Metallurgist*, 59(7-8), 647–652.
- Atkinson, H. V., Zulfia, A., Lima Filho A., Jones, H., and King, S.(1997). Hot isostatic processing of metal matrix composites, *Materias Design*, 18(4–6), 243–245.
- Convay J.J., Rizzo F.J., (1998). Hot Isostatic Pressing of Metal Powders, *ASM Handbook 7*.
- Çelik, E., (2011). Elmaslı Kesici Takımlarda Alternatif Bağlayıcılar. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi ABD Doktora Tezi, Elazığ.
- Çelik, Ö., (2009). Kobalt Katkılandırılmış Zn0 Yarıiletken Malzemelerin Üretimi Ve Elektriksel Özelliklerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi ABD Doktora Tezi, Elazığ.
- Davis, J. R. (2001) Copper and Copper Alloys. *ASM Handbok 7*.
- Gök, M. G., & Kaplan, M. (2011). Toz Metalurjisi Yöntemiyle Elektrik Kontak Malzemesi Üretimi ve Kontak Performansının Araştırılması”, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey
- Kaplan, M., Çelik, Ö., and Budak, S., (2011). The Effects of Co Additions on the Microstructure and Conductivity Properties of ZnO, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Elazığ, Turkey.
- Klar, E., and Fesko, J.W., 1984, Production of metal powders, *Metals Handbook*, 9th ed. Vol. 7, Powder Metallurgy, 25 – 51, Ohio.
- Konstanty J. (2005), *Powder Metallurgy Diamond Tools Book*, ISBN: 978-1-85617-440-4
- Yildiz, T., Kati, N., & Gür, A. K. (2018). The effect of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of alloys produced by using hot isostatic pressing method. *Journal of Alloys and Compounds*, 737, 8-13.
- <http://www.agrawalmetal.com/admin/amupdf/1389697108Amu.pdf> (11.02.2019)
- [https://www.engineersedge.com/properties\\_of\\_metal\\_s.htm](https://www.engineersedge.com/properties_of_metal_s.htm) (13.02.2019)
- <https://www.makeitfrom.com/material-properties/3-4-Hard-H03-C23000-Brass> (05.02.2019)

## The Effect on Electrical Conductivity of Production Parameters of Ni Addition at 85/15 Bronze Composite

### Extended abstract

*In this study, the effect of sintering pressure and sintering temperature on the electrical conductivity of 3% Ni-reinforced CuSn (85/15) Bronze alloy was investigated. For this purpose, 3% Ni reinforced composite material which is produced by hot pressing of powder metallurgy was produced. Sintering temperature was kept constant at 700 ° C and 800 ° C sintering time for 15 min, and sintering pressure was 20 MPa and 30 MPa. In the hot pressing process, the simultaneous application of heat and pressure during sintering is one of the biggest advantages of this method. Therefore, nearly all of the gaps that may occur during manufacturing are eliminated. Thus, more compact composite material is obtained. Produced Cu / Sn / Ni composite samples were prepared for microstructure analysis and SEM and EDS analyzes were performed. Macrohardness were taken from the samples in order to examine the mechanical behavior of the samples. Finally, the electrical conductivity values, the conductivity and the % IACS values of the samples were measured.*

*In this study, in order to form a homogenous structure by mixing these metal powders in Ni pure metal to be added to the bronze of 85/15, type 88 rotary type mixer is used.*

*In this study, pressing and sintering process, which is one of the most important production stages in composite materials, has been made as hot press. Therefore, the most important advantage of our work is the manufacture of hot press. This process requires a hot press machine and a graphite mold tool which is prepared according to the dimensions of the composite samples to be produced. Hot pressing was performed by simultaneous application of heat and pressure. With the simultaneous application of heat and pressure, all or almost all of the gaps have been removed. The hot pressing method is a very fast process and it is very fast in industry.*

*Stiffness measurements of the samples obtained by hot pressing were performed. The hardness of all samples was measured in Brinell. Hardness values*

*increase with increasing sintering temperature and pressure.*

*"Keithly 6517A Electrometer lik was used for conductivity measurements with direct current. This device; temperature controller, electrometer, computer and various electronic devices. The samples were measured by measuring the thickness between the two electrodes connected to the electrometer and measured at 5 V DC voltage at room temperature. I / V graphs are drawn for each sample from these values. In this graph, the slope of each zone separated and the individual activation energies were calculated. Electrical conductivity was determined by the obtained data.*

*When conductance of conductivity and % IACS graphs, the conductivity value increased as the sintering pressure and temperature increased. As the bond strength between the metal particles will increase as a result of sintering and pressure, diffusion will also increase. Therefore, due to increased diffusion, the metallic bond will be strengthened and thus the conductivity value is increased.*

*As a result of investigations made on the samples produced by hot pressing method of powder metallurgy production methods; different sintering temperature, different sintering pressure and different composition ratios were obtained. It was determined that different factors were effective in the formation of these values.*

*Graphs I and V values can be calculated by taking  $\alpha$ , and  $\sigma$  conductivity values as can be calculated. As a result of the calculations, the conductivity value increased as the sintering pressure and temperature increased. As the bond strength between the metal particles will increase as a result of sintering and pressure, diffusion will also increase. Therefore, due to increased diffusion, the metallic bond will be strengthened and thus the conductivity value is increased.*

**Keywords:** %IACS, 85/15 bronz, electrically conductivity



# Seramik Sırlama Makinesi Pnömatik Eyleyici Sisteminin Tasarımı ve Sistemin İmalatı

**Erhan AÇIKGÖZ\***

Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa  
[501610008@ogr.uludag.edu.tr](mailto:501610008@ogr.uludag.edu.tr) ORCID: 0000-0001-7528-9193, Tel: (542) 629 93 18

**Elif Erzan TOPÇU**

Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa  
[erzan@uludag.edu.tr](mailto:erzan@uludag.edu.tr) ORCID: 0000-0002-6115-3110, Tel: (224) 294 1990

Geliş: 15.07.2019, Revizyon: 04.09.2019, Kabul Tarihi: 20.09.2019

## Öz

Seramik malzeme üzerine sırlama işlemi genellikle estetik veya mukavemeti iyileştirici sebeplerden dolayı yapılmaktadır. Elle veya otomasyon sistemiyle gerçekleştirilen bu işlem günümüzde yerini daha çok otomasyon sistemlerine bırakmıştır. Otomasyon sistemiyle yapılan sırlama işleminde malzemeyi çalkalama aşamasında kullanılan tahrik sistemlerinde genellikle elektrik motorları veya pnömatik pistonlara sahip mekanizmalar kullanılmaktadır. Belirli bir çalkalama periyodunda sırlama işlemini gerçekleştirmek için pnömatik eyleyici sisteminin kullanılması ise sırlama makinesinin üretim maliyetini azaltıcı bir unsurdur.

Bu çalışmada seramik klozet sırlama makinesinin pnömatik eyleyici sisteminin tasarımı, sistem üzerinde montajı ve prototip imalatı incelenmiştir. Önce Solidworks programında makinenin kaynaklı montajı yapılarak, eyleyici sisteminin tasarımı için gerekli olan yükler belirlenmiştir. Tahrik sistemindeki mil, tork kolu, pnömatik piston ve konik kilit gibi elemanların boyutlandırılması ve seçimi yapılmıştır. Tahrik milinin, tork kolunun ve konik kilit parçasının yük altındaki gerilmeleri Solidworks Simulation programı ile incelenmiştir. Bu şekilde üretim öncesinde sistemdeki hatalar ve arıza oluşturabilecek durumlar tespit edilerek zaman ve üretim maliyeti açısından avantaj sağlanmış ve sonrasında imalatı gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayar destekli tasarım, Seramik sırlama makinesi, Sonlu elemanlar yöntemi, Solidworks simülasyon, Pnömatik eyleyici

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Seramik malzemeler kil, kaolin ve benzeri maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilirler.

Seramik malzeme yüksek sıcaklık dayanımına sahip olması, yapısının sert ve metallere hafif olması, hammadde olarak bol miktarda bulunması, pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi, erozyon, oksitlenme ve aşınmaya karşı direncinin yüksek olması, sürünme katsayısının düşük olması, basma mukavemetinin yüksek olması gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Bütün bu üstün özelliklerine rağmen, seramik malzemelerin istenmeyen özelliği ise bu malzemelerin gevrek karakterde olmalarıdır.

Seramik ürünler günümüzde yapı işlemlerinde, ev eşyalarında, elektrik malzemelerinde, uzay araçlarında, tıp alanında, aşındırıcı malzeme yapımında vb. pek çok alanda kullanılmaktadır .

Seramik malzemenin üzerinde parlak ve kaygan bir yüzey oluşturmak, çamura etki eden mekanik güçlere dayanma gücünü arttırmak, malzemeyi sıvı ve gazlardan korumak, seramik yüzeyine renk ve doku özellikleri getirerek estetik değerini artırmak gibi sebeplerden dolayı sırlama işlemi yapılır. Sır, seramik çamurunu ince bir tabaka şeklinde kaplayarak onun üzerinde eriyen cam veya camsı oluşumdur. Seramik sırlarının üzerine çekildiği çamur ile normal koşullarda fiziksel ve kimyasal bağ kurması istenir. Bu bağın iyi veya zayıf olması sırla başarısını belirler. Seramik malzemenin sırlama işlemi için daldırma, püskürtme, akıtma, fırça ve benzeri malzemelerle sırlama gibi farklı teknikler kullanılmaktadır. Günümüzde bu işlemlerin gerçekleştirilmesi için sırların hazırlanması endüstriyel olarak yapılmakta ve üretim daha çok otomasyon sistemleri kullanılarak gerçekleşmektedir. Sırlama makinelerinde çalkalama hareketindeki tahrik işlemi ise elektrik motorları veya pnömatik eyleyicilerle gerçekleştirilmektedir. Gelişen robot teknolojisi ile robotlar da sırlama işlemi için kullanılmaya

başlanmıştır. Robotlar bilgisayarlarla kontrol edilerek oldukça fazla miktarda sırlama yapabilmektedirler .

Bu çalışma kapsamında pnömatik eyleyici sistemine sahip bir seramik sırlama makinesinin tasarımı ve imalatı incelendiğinden literatür araştırmasında da bilgisayar destekli makine tasarımı ve analizi üzerine inceleme yapılmıştır. Bao ve diğerleri (2007) sırlama hatalarının giderilmesi için makine vizyonuna dayalı olarak seramik kap yüzeyinde sır incelemesi yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarında seramik kapların ortak kusurlarının görüntü işleme algoritması tanıtılarak, çevrimiçi test platformu oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar sistemin seramik kap ürünlerinin yüzeyindeki kusurları etkili bir şekilde parlatabildiğini göstermiştir. Balaquer ve diğerleri (2009) boyutsal analiz kullanarak seramik fayans sırlarının modellenmesini ve kontrolünü yapmışlardır. Simülasyon örnekleri, sadece sır sıcaklığını ölçerek birikmiş sır kütlesini kontrol etmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte sır akışının ölçümü biriken kütle üzerinde kritik bir değişken olmuştur. Bilgisayar destekli makine ve parça tasarımı ve analizi uzun yıllardır endüstrinin pek çok farklı alanında uygulanmaktadır. Açıkgöz ve Topçu (2018) çalışmalarında sırlama makinesinin yüke maruz kalan, tasarımda önem arz eden tahrik mili ve seramik malzeme yükünü taşıyan çeşitli parçalarının yük altındaki davranışlarını "Solidworks Simulation" programında sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Eren ve Kaftanoğlu (2001) çalışmalarında altı serbestlik dereceli bir endüstriyel robotun tasarımı, imalatı ve montajını yapmışlardır. Çalışmada fiziksel montajdan önce bilgisayar ortamında yapılan üç boyutlu sanal montaj işlemi ile oluşabilecek montaj problemleri önceden çözümlenebilmiştir. Fetvacı ve İmrak (2004) evolvent profilli düz dişli çarkların sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişler ve dişdibi bölgesinde yorulma çatlağını tetikleyen gerilme yığılmasını yükleme şartlarına göre inceleyen model kullanmışlardır. Zeytinoğlu M. (2006) araştırmasında 3.5 tonluk tek dingilli bir tarım arabasının çeki halkasını incelemeye almıştır.



Çalışmada sistem üzerine etkiye kuvvetler belirlenerek mukavemet analizi yapılmıştır. Lekesiz (2018) yarı-hermetik bir kompresörün krank milinin yapısal analizi için alternatif bir yaklaşım sunmuştur. Sistemin yapısal analizi sanki-statik yaklaşımla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atalet etkileri kinematik analize dayandırılarak tespit edilmiştir ve yapısal analizde sınır koşulları bu analizlere göre belirlenmiştir. Çalışma sırasında oluşan atalet etkileri de hesaba katılarak, kinetik analiz neticesinde ortaya çıkan kuvvetler statikmiş gibi tatbik edilerek yapısal analiz yaklaşımı uygulanmıştır. Topaç ve Bahar (2019) dört tekerlekten çekişli bir hizmet taşıtının sabit ön süspansiyonunda kullanılan parabolik yaprak yayların yük-şekil değişimi karakteristiğini doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi ile incelemişlerdir. Yayların ayrıntılı sonlu elemanlar modeli kurularak, sistemin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yapılmış ve yayın düşey kuvvete göre şekil değişimi incelenmiştir. Analiz sonuçlarının test sonuçlarıyla uyumlu çıktığı ve maksimum sapmanın % 3.3 olduğu tespit edilmiştir. Doğan ve diğerleri (2018) diş dibinde oluşan eğilme gerilmesinin hesabı için grafik ve sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Standart olmayan dişli çarklar için diş dibinde oluşan gerilmeler üzerinde hangi parametrenin daha etkili olduğu araştırmışlardır.

Bu çalışmada sırlanacak seramik ürün olan klozeti önce “hareketli sırlama kompleksi” yardımıyla akıtma yöntemine göre sırlayan sonra da sırrın homojen olarak dağılması için pnömatik eyleyici sistem ile ürünü istenilen zaman-adım profiline uygun şekilde çalkalayan bir makine incelenmiştir. İlk aşamada “Solidworks” programında makinenin kaynaklı montajı yapılarak, eyleyici sisteminin tasarımı için gerekli olan yükler belirlenmiştir. Elde edilen değerlere göre eyleyici sistemindeki tahrik mili, tork kolu, pnömatik piston ve konik kilit gibi elemanların boyutlandırılması ve seçimi yapılmıştır. İkinci aşamada tahrik milinin, tork kolunun ve konik kilit parçasının yük altındaki gerilmeleri “Solidworks Simulation”

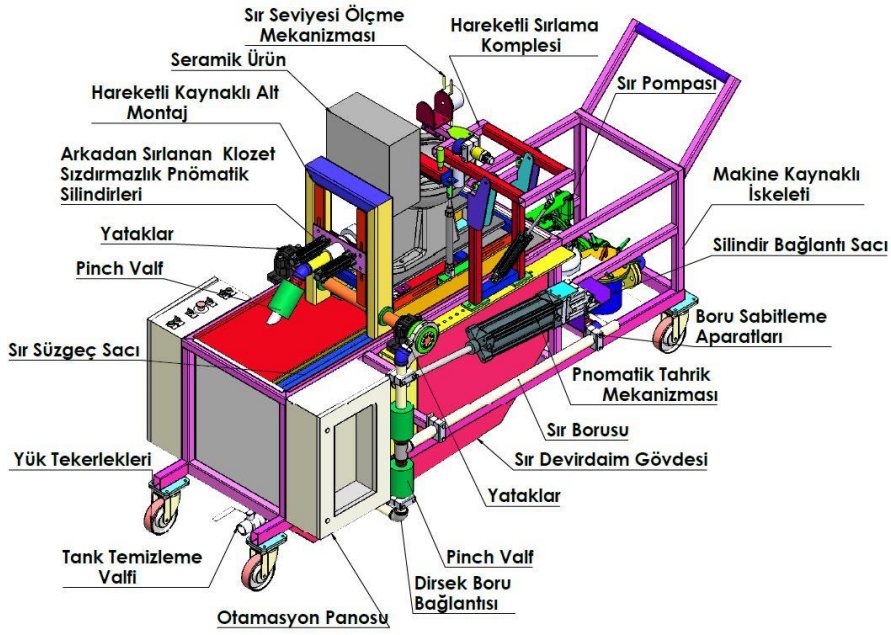
programında elde edilmiştir. Bu şekilde üretim öncesinde sistemdeki hatalar ve arıza oluşturabilecek durumlar tespit edilerek zaman ve üretim maliyeti açısından avantaj sağlanmıştır. Üçüncü ve son aşamada da sistemin imalatı gerçekleştirilerek satışa uygun hale getirilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

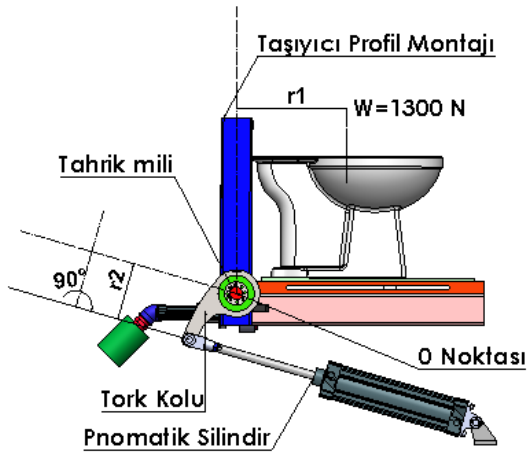
### Sistemin tasarımı ve boyutlandırılması

Günümüz sistemlerinin tasarım ve analizinde kullanılan bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve bilgisayar destekli mühendislik (CAE) yazılımları gerek parça gerek makine için üretim aşamasında ortaya çıkabilecek hataların önceden tespit edilerek bu hataların en aza indirilmesini sağlamaya yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada da CAD ve CAE yöntemleri kullanılarak çalışmalar yapılmıştır.

Sırlama işlemine tabi tutulacak yapı alttan sırlama boşaltma deliğine sahip iç kısmı sırlanacak bir klozetdir. Makine tasarımında arkadan ve alttan delikli klozetleri sırlayabilecek şekilde tasarım yapılmıştır. İç kısmı sırlanan klozetler daha sonra dış yüzeylerini sırlayan hatlardan geçirilerek dış yüzeyleri de sırlanmaktadır (Açıkgöz ve Topçu, 2018). Şekil 1’ de makinenin üç boyutlu izometrik görüntüsü ve bileşenleri gösterilmiştir. Ürüne “hareketli sırlama kompleksi” yardımıyla sır akıtıldıktan sonra bu sırrın homojen dağılımını sağlamak amacıyla yapılan çalkalama hareketi 6 bar işletme basıncı ile çalışan bir adet çift etkili pnömatik silindir ve tork kolu vasıtasıyla sağlanmaktadır. Çalkalama işlemindeki zaman-adım profili ise otomasyon sistemi üzerinden tanımlanmaktadır. Şekil 2’ de bu tahrik sisteminin temel elemanları gösterilmiştir. Silindirin boyutları sırlama işlemi gerçekleştirilecek klozetin makine üzerine montajı yapıldıktan sonra piston üzerine gelen yüklerin belirlenmesiyle hesaplanmıştır.



Şekil 1. Makinenin üç boyutlu izometrik görüntüsü



Şekil 2. Pnömatik eyleyici ve tahrik sistemi bileşenleri

Çalkalama hareketi dakikada iki kere tekrarlanmaktadır ve bir strokta  $105^\circ$ 'lik açı ile ürün döndürülmektedir. Şekil 3' de çalkalama sisteminin dönme hareketi, Şekil 4' de de sistem hareketinin zaman-konum grafiği gösterilmiştir. Şekil 3' de X ve Y eksenlerinde görüldüğü gibi  $15^\circ$  olacak şekilde yatay ile toplamda  $105^\circ$ 'lik sır çalkalama hareketini gerçekleştirmektedir. Bu

hareketin profili, açısı sırrın özelliklerine göre yazılan otomasyon programından değiştirilebilmektedir. Hareket boyunca açısal hız değişimleri ileri ve geri hareket sırasında sabittir ve bekleme halinde de sıfırdır. Bu sebeple açısal ivme değeri de sıfır olmaktadır. Sistemi çalıştıracak piston kuvvetinin tespiti için Şekil 2' de gösterilen O noktasına göre moment alınarak Newton' un II. Hareket yasası uygulanacak olursa;

$$\sum M_o = I \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

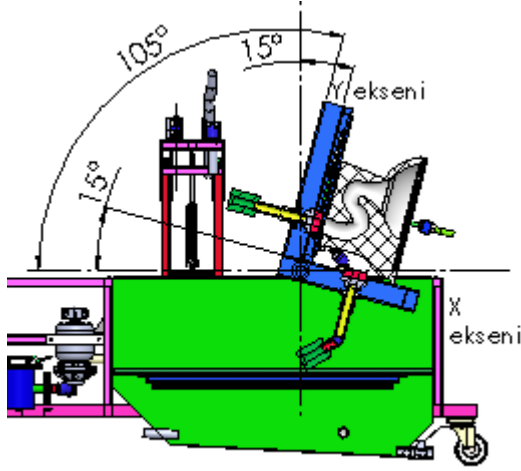
$$F_{piston} = W \frac{r_1}{r_2} \quad (2)$$

denklemlerinden piston kuvveti  $F_{piston} \cong 2527,17$  N olarak hesaplanır. Piston çapı ise 6 bar işletme basıncı için

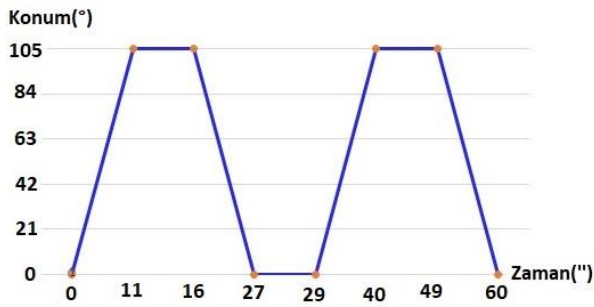
$$P_{işletme} = \frac{F_{piston}}{A} \quad (3)$$

formülü yardımıyla yaklaşık  $d_{piston} \cong 74$  mm olarak hesaplanır. Elde edilen bu değerlere göre pnömatik silindir kataloglarından piston çapı 100

mm olan standart çift etkili pnömatik silindir seçilmiştir. Solidworks programında yapılan montaj çalışmasıyla, yapılacak iş ve tahrik sisteminin sistem üzerindeki yerleşimi açısından



Şekil 3. Çalkalama sisteminin hareketi



Şekil 4. Çalkalama işleminin zaman-konum grafiği

325 mm piston stroğunun yeterli olduğu görülmüştür.

Çalkalama işlemindeki tahrik mili çalışma sırasında burulmaya maruz kalmaktadır. Milin emniyetli çalışabileceği minimum mil çapı burulma momenti

$$M = \tau_{em} W_p \quad (4)$$

ve atalet momenti

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (5)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır. Çalışma sırasında tahrik milinde maksimum 455 Nm burulma momenti oluşmaktadır. Mil malzemesi olarak AISI 304 malzeme kullanılmıştır ve bu malzemenin kayma gerilmesi değeri malzeme tablolarından  $\tau = 170 \text{ N/mm}^2$  olarak okunmuştur. Emniyet katsayısı 5 alınarak yapılan hesaplamalarla mil çapı  $d = 40 \text{ mm}$  olarak tespit edilmiştir.

Makinede tahrik mili ve tork kolu bağlanırken kamalı bağlantı yerine konik kilit kullanılmıştır. Konik kilitin geleneksel kama bağlantısına göre mil üzerinde istenen konumda hassas sabitleme, zaman ve işçilikten kazanım, takma ve sökme işlemi yapılırken sistemin zarar görmemesi, takarken veya sökerken çakma işlemine gerek duymaması, çektirme sistemi sayesinde kolay çıkarılması gibi avantajları vardır. Makinenin maruz kaldığı maksimum tork değerine göre konik kilit kataloğundan uygun konik kilit seçilmiştir. Seçilen konik kilitin 3 boyutlu izometrik görüntüsü Şekil 5’ de verilmiştir. Konik kilit makinenin maksimum iletmesi gereken torktan yaklaşık 3 kat daha emniyetli seçilmiştir ve 40 mm’ lik montajlanacak mil çapı için 1450 Nm olarak katalog üzerinden okunmuştur.

### Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Sistemin Analizi

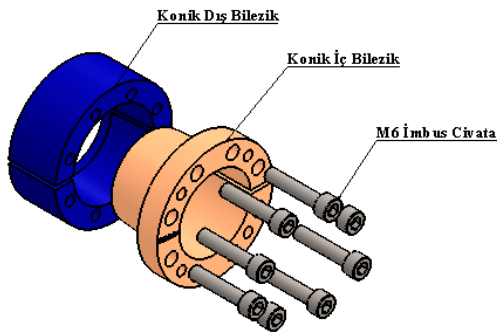
Sistemin tasarım, boyutlandırma ve montajlama işlemlerinin tamamlanmasından sonra gerçekleştirilen analiz çalışması “Solidworks Simulation” programı ile yapılmıştır. “Solidworks Simulation” programı ile bilgisayarda çizilen katı model üzerinde analiz yapıldığında, en yüksek von-Mises gerilmelerinin yanı sıra gerilmelerin yoğunluk dağılımı, gerilmelerin buldukları yerler ve gerinimler grafiksel olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca sistemlerin gerçek çalışma şartlarının benzetimi de yapılabilmektedir.

Çalışmada konik kilidin analizini gerçekleştirebilmek için montajlanmış katı

model üzerinden sıkma civataları çıkarılmış ve model daha basit hale getirilerek analiz

**Tablo 1.** Malzemelerin mekanik özellikleri

	AISI 304	Ck45 (1.1191)	Birim
Elastisite Modülü	19000	210000	N/mm <sup>2</sup>
Poison Oranı	0.29	0.28	-
Yoğunluğu	8000	7800	kg/m <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	517.017	750	N/mm <sup>2</sup>
Akma Dayanımı	206.807	565	N/mm <sup>2</sup>

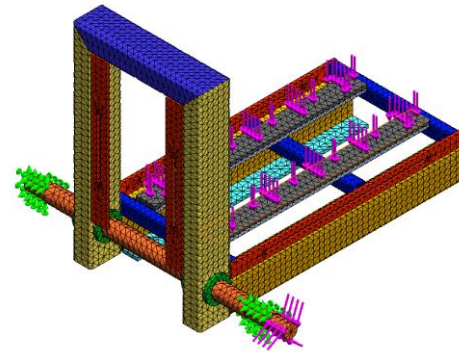


*Şekil 5. Rexnord TLK 130 Konik Kilit Katı Modeli Görünümü*

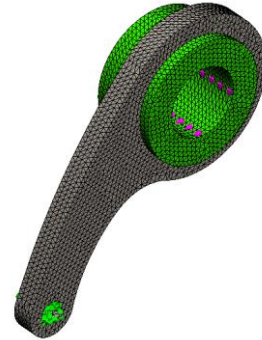
gerçekleştirilmiştir. Analizi yapılacak parçalar “Solidworks Simulation’a” alınıp malzeme atamaları yapılmıştır. Sonra sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

“Solidworks Simulation” kütüphanesinden atanan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Şekil 6a’da gösterilen taşıyıcı profil sonlu elemanlar modeli sistemin çalışma koşullarına göre yataklanmasıyla oluşturulmuştur. Seramik ürünü taşıyacak bölümlere şekilde görüldüğü gibi 500 N yayılı kuvvet ve pnömatik silindirin tahrik ettiği mil kademesine etki eden moment CAE programına tanıtılmıştır. Taşıyıcı profilin ve Şekil 6b’de verilen tork kolunun malzemesi AISI 304 paslanmaz çelik malzeme seçilmiştir. Tork kolu pnömatik tahrik silindirinin bağlanacağı delikten sabitlenmiş, makine çalışırken oluşabilecek maksimum tork değeri olan 455 Nm analiz programına tanıtılmıştır.

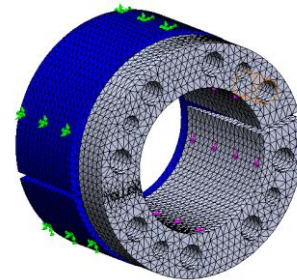
Konik kilit malzemesi olarak Ck45 malzeme kullanılmıştır. Ck45 malzemesinin mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Konik kilit Şekil 6c’de gösterildiği gibi dış yüzeyden sabitlenmiş ve iç delik yüzeyine makine çalışma esnasında maksimum tork değeri olan 455 Nm tanıtılarak analizler yapılmıştır. Çalışmada tahrik sisteminin bu üç temel elemanı için analizler yapılmıştır. Taşıyıcı profil montajın, konik kilidin ve tahrik torku kolunun yük altındaki



a)



b)



c)

*Şekil 6. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması*

*a)Taşıyıcı profil Montajı*

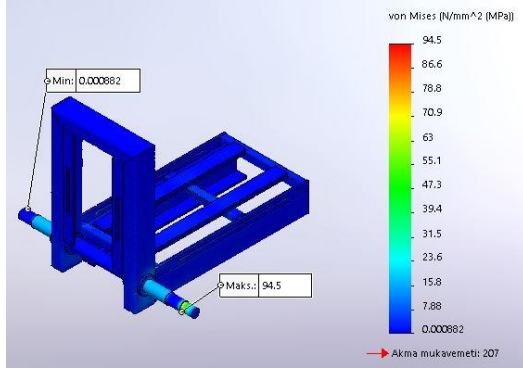
*b)Tork kolu*

*c)Konik kilit*

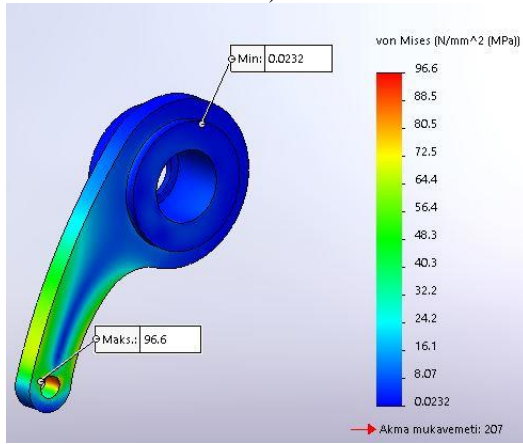
gerilmeleri sonlu elemanlar yöntemi ile ayrı ayrı analiz edilerek incelenmiştir.

Şekil 7’de yapılan analizlerin sonuçları grafik olarak verilmiştir. Taşıyıcı profil montajın analizinde maksimum von Mises gerilmesi 94.5

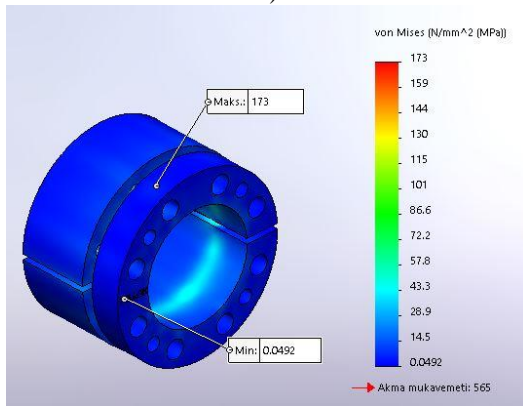
MPa, tork kolunda maksimum von Mises gerilimi değerinin ise 96.6 MPa olduğu tespit edilmiştir. İki malzemenin akma dayanımı olan 207 Mpa’yı geçmediği için sistemin çalışmasında bir sorun olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Konik kilit malzemesinde maksimum von Mises gerilmesi 173 MPa bulunmuştur. Ck45 malzemenin akma dayanımı



a)



b)



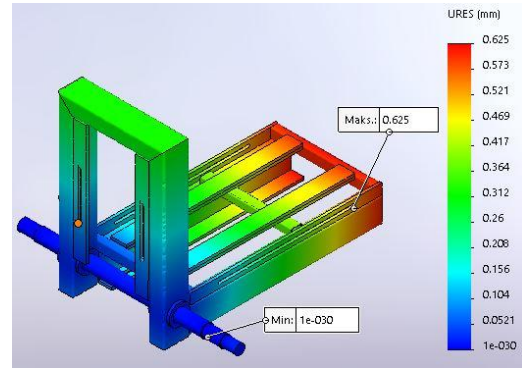
c)

Şekil 7. Analiz sonuçları von Mises gerilmeleri

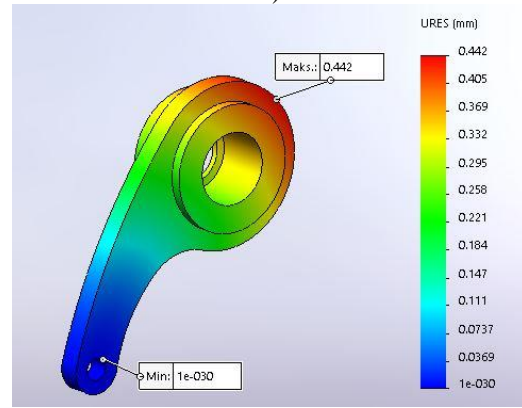
a) Taşıyıcı profil montajı von Mises gerilmeleri

b) Tork kolu von Mises gerilmeleri

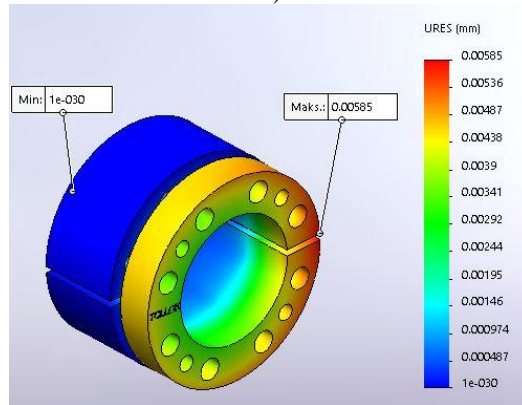
c) Konik kilit von Mises gerilmeleri



a)



b)



c)

Şekil 8. Analiz URES(mm) yer değiştirme Sonuçları

a) Taşıyıcı profil montajı URES(mm)

b) Tork kolu URES(mm)

c) Konik kilit URES(mm)



Şekil 9. Üretimi yapılan seramik sırlama ve çalkalama makinesi

565 MPa'ı aşmadığı için konik kilidin deformasyona uğramadan düzgün bir şekilde çalışabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Makine çalışırken müsaade edilebilecek maksimum sehim 1.2 mm'dir. Şekil 8'de yapılan analizlerin maksimum sehim grafik sonuçları verilmiştir. Taşıyıcı profilde maksimum sehim 0.625 mm, tork kolunda maksimum sehim 0.442 mm, konik kilit de maksimum sehim 0.005 mm olduğu ve makine çalışırken istenen sehim miktarını aşmayacağı görülmüştür. Yapılan analizlerin sonuçları Tablo 2'de bir bütün olarak belirtilmiştir.

Tablo 2. Analiz Sonuçları

	Maksimum von Mises Gerilmesi(Mpa)	Maksimumum Sehim (mm)
Taşıyıcı Profil	94.5	0.625
Tork Kolu	96.6	0.442
Konik Kilit	173	0.005

### Üretimi yapılan makina

Şekil 9' da üretimi yapılarak satışa sunulmaya başlanmış olan makinenin çalışma anındaki resmi verilmiştir. Sırlama makinesinde ürünün iç yüzeyi önce sır ile doldurulma/ boşaltma işlemi yapılarak sırnın homojen dağılması için makinenin pnömatik eyleyici sistemi yardımıyla çalkalama hareketi gerçekleştirilmektedir.

## Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada 6 bar işletme basıncında çalışan pnömatik silindirler ile tahrik edilen seramik sırlama makinesi bilgisayar destekli modelleme ve analiz yöntemleri kullanılarak tasarlanmış, montajlanmış ve makinenin çalışabilirliği bu şekilde tespit edilmiştir. Yapılan Ar-Ge çalışmalarında makinenin elektrik motoru ile tahrik edilen modeli üzerine de çalışılmış, analizi yapılmış ve bilgisayar ortamında montajı gerçekleştirilmiştir. Ancak pnömatik silindir ile tahrik edilen makinenin elektrik motoru ile tahrik edilen makine sisteminden daha az maliyet ile imal edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Bu sebeple pnömatik tahrikli sırlama makinesi montajlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmaları sonucunda makinenin yapılan tasarımla güvenli bir şekilde çalışabileceği tespit edilmiştir. Üretilen makinenin birçok adet satışı yapılmıştır. Makinenin üretim maliyetlerini ve montajlama süresini düşürmek için Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir.

## Teşekkür

Bursa Beril Makine' ye vermiş olduğu destekten dolayı teşekkür ederiz.

## Semboller

A=Alan (m<sup>2</sup>)

F<sub>piston</sub>=Kuvvet (N)

M= Moment (Nm)

W= Ağırlık kuvveti (N)

W<sub>p</sub>=Polar mukavemet momenti (m<sup>3</sup>)

d= Mil çapı (m)

r<sub>1</sub>,r<sub>2</sub>= O noktasına olan uzaklık (m)

τ<sub>em</sub>= Emniyet gerilmesi (N/m<sup>2</sup>)

τ<sub>t</sub>= Kayma gerilmesi (N/m<sup>2</sup>)

## Kaynaklar

- Açıkgöz, E., Topçu. E., Kayaoğlu. Ö., (2018). Seramik Sırlama Makinesi Parçalarının Tasarımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, International Symposium Industrial Design Engineering, ISIDE 18, 189-195.
- Balaguer, P., Sanchis, R., Romero, J., Penarrocha I., Arino C., (2009). Modeling and control of ceramic tile glazing using dimensional analysis, 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, DOI: 10.1109/IECON.2009.5414755.
- Bao, N., Ran, X., Wu, Z., Xue, Y., Wang, K., (2007). Design of inspection system of glaze defect on the surface of ceramic pot based on machine vision, 2 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC) , 1486 – 1492.
- Doğan, S., Güven, C., Karpat, F., Yılmaz, T., Doğan, O., (2014). Experimental Verification and Finite Element Analysis of Automotive Door Hinge, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, Vol: 11, doi:10.1115/IMECE2014-39295.
- Doğan, O., Yılmaz, T. G., Karpat, F., Farklı parametrelere sahip evolvent düz dişli çarkların sonlu elemanlar yöntemi ve grafik metot ile gerilme analizi. (2018). *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, [S.1.], v. 33, n. 4, ISSN 1304-4915.
- Eren, O., Kaftanoğlu B., (2001). Altı Serbestlik Dereceli Bir Endüstriyel Robotun Tasarımı İmalatı ve Çalıştırılması, *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 4(2), 103 – 111.
- Fetvacı, M.C., İmrak, C.E., (2004). Düz Dişli Çarkların Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2, 46-54.
- Lekesiz, H., (2018). Pistonlu yaro-hermetik soğutma kompresörü krank milinin sanki-statik yaklaşımla sonlu elemanlar analizi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23 (1), 97-110. DOI: 10.17482/uumfd.301655
- MEGEP, (2007). Sır Hazırlama, Seramik ve Cam Teknolojisi , Ankara.
- MEGEP, (2007). , Sırlama ve Pişirim, Seramik ve Cam Teknolojisi , Ankara.
- MEB, (2003). Metal Mesleğinde Tablolar, İstanbul.
- Mercan, M., (1999). Sırlama Teknikleri, *Metalurji Dergisi*, 121.Sayı: Seramik, Sayfa 18-22.
- Topaç M. M., Bahar İ., (2019). Bir askeri hizmet taşıtında kullanılan parabolik yaprak yayın yay karakteristiğinin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi yardımıyla belirlenmesi, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 115-120.
- Toplan, Ö., (2008). Geleneksel Seramikler, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Lisans Ders Notları.
- Zetinoğlu, M., (2006) . Sonlu Elemanlar Yöntemiyle 3.5 Tonluk Tek Dingilli Bir Tarım Arabasına Ait Çeki Halkasının Gerilme Analizi , *U.Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, Sayı: 2(21),21-24.
- Seramik ve porselen nedir, özellikleri, kullanım alanları.  
<http://www.hurbilgi.com/index.php/2015/05/08/s-eramik-ve-porselen-nedir-ozellikleri-kullanim-alanlari>. Yayın tarihi Mayıs 8, 2015. Erişim tarihi Temmuz 12, 2019.
- Konik kilit sisteminin üstünlükleri.  
[http://www.konikkilit.com/konik\\_kilit\\_nedir.asp](http://www.konikkilit.com/konik_kilit_nedir.asp). Erişim tarihi Temmuz 12, 2019.
- Locking assembly - self-centering TLK 131.  
<https://www.traceparts.com/tr/product/rexnord-tollok-srl-element-de-serrage-autocentrant-tlk-131?Product=10-13062016-067657>. Erişim tarihi Temmuz 12, 2019.
- Rexnord Tollok Assemblies Katalog.  
[https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrar y/documents/pt2-001\\_catalog](https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrar y/documents/pt2-001_catalog). Erişim tarihi Temmuz 12, 2019.
- Seramiğin kullanım alanları.  
<http://seramikevi.blogspot.com.tr>, Yayın tarihi Şubat 8, 2008. Erişim tarihi Temmuz 12, 2019.

## **The Design of a Pneumatic Actuator System for Ceramic Glazing Machine and Manufacturing of the System**

### **Extended abstract**

*Glazing is carried out for reasons such as creating a shiny and slippery surface on the ceramic material, increasing its resistance to mechanical forces affecting mud, protecting the material from liquids and gases, increasing the aesthetic value by bringing color and texture properties to the ceramic surface. This process, which is mainly performed by hand or automation system, has now been replaced by more automation systems. The drive system used in the glazing process in automation systems is generally made by mechanisms with electric motors or pneumatic pistons. The use of a pneumatic actuator system to perform the glazing process in a particular agitation period is a factor that reduces the production cost of the glazing machine.*

*In this study, the design, assembly and prototype manufacturing of a ceramic toilet glazing machine pneumatic actuator system is examined. First, the welds of the machine in Solidworks program were determined and the loads required for the design of the actuator system were determined. Sizing and selection of elements such as shaft, torque arm, pneumatic piston and conical lock in the drive system has been made. The product has been selected from conical lock product catalogs with maximum torque and safe shaft diameter determined in the system. The stresses of the shaft, torque arm and conical lock part under load were examined with Solidworks Simulation program. In this way, faults in the system and situations that could cause malfunctions were determined before production and advantage was provided in terms of time and production cost and then production was realized.*

**Keywords:** *Computer aided analysis, Ceramic glazing machine, Finite element method, Solidworks Simulation, Keyless locking devices*





# Asidik dağlama prosesinde farklı HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının titanyumun yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkisi

**Tuncay DİKİCİ\***

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Torbalı Meslek Yüksekokulu, Kaynak Teknolojisi Programı, İzmir

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektronik Malzemeler Üretim ve Uygulama Merkezi, İzmir

[tuncay.dikici@deu.edu.tr](mailto:tuncay.dikici@deu.edu.tr) Orcid.org/0000-0002-7004-9788 Tel: (232) 853 18 20 (191)

Geliş: 03.08.2018, Revizyon: 02.10.2018, Kabul Tarihi: 05.11.2018

## Öz

*Titanyum implantların canlı kemik dokusu ile olan etkileşiminde önemli rol oynayan faktörlerden en önemlisi yüzey özellikleridir. İmplantın yüzey morfolojisi ve pürüzlülük derecesi ise bu özelliklerin başında gelmektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranlarına sahip asit çözeltisi içinde gerçekleştirilen dağlama işleminin, kumlanmış ve kumlanmamış saf titanyumun (Cp-Ti, Gr2) yüzey özelliklerine olan etkilerinin incelenmesidir. Beş farklı karışım oranında yapılan dağlama prosesi 60 °C sıcaklıkta 10 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir. İşlem gören titanyum numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Dağlama sonucu titanyum yüzeylerin pürüzlülük değerleri ise profilometre ile belirlenmiştir. HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranındaki değişim titanyumda farklı yüzey morfolojilerinin oluşumuna yol açmıştır. İmplantın mekanik stabilitesinde önemli rol oynayan farklı boyut ve şekillerde mikro çukurların oluşumu gözlemlenmiştir. Kumlanmış titanyum yüzeylerde dağlama sonrası kumlanmamış morfolojilere benzer yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak yüzey pürüzlülüğü noktasında kumlama işleminin bariz bir etkisinin olduğu da görülmüştür. Dağlama ile yüzeyde oluşan pürüzlülük değeri ortalama Ra = 0,5 µm iken, kumlama + dağlama işlemi sonucu bu değer Ra = 2 µm'ye doğru arttığı tespit edilmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** Asidik dağlama; Yüzey morfolojisi; Pürüzlülük; İmplant; Kumlama

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Titanyum ve titanyum alaşımları, sahip oldukları yüksek mekanik özellikler, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluklarından dolayı dental ve ortopedik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (McCracken, 1999). İmplant ve canlı doku arasındaki biyolojik etkileşim için yüzey morfolojisi oldukça önemlidir (Wong vd., 1995; Perrin vd., 2002). Yüzey pürüzlülüğü ise, hücre proliferasyon ve yüzey enerjisi arasındaki ilişkiyi etkileyen diğer önemli bir parametredir (Ban vd., 2006). Konsantre asit içindeki titanyumun dağlanması (etching) biyolojik uygulamalarda yeni yüzey modifikasyonları geliştirmek için oldukça ilgi çekici bir yöntemdir. Titanyum yüzeylerini modifiye etmek amacıyla çeşitli asitler kullanılır. Yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip SLA (Sandblasted Large grit Acid etched) adını verdiğimiz yüzeyler ise kumlama ve asitle dağlama işlemi ile elde edilirler (Conforto vd., 2002).

Kumlama işlemi, düşük maliyet ve kolay uygulanabilir olmasından dolayı yüzey modifikasyon prosesleri içinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Farklı boyutlara sahip kumlar bir kompresör aracılığıyla sağlanan basınçlı hava yardımıyla yüzeye püskürtülerek uygulanır. En yaygın kullanılan kumlar; alümina ( $Al_2O_3$ ) (Schweikl vd., 2007), silisyum karbür (SiC) (Yang vd., 2008), titanyum oksit ( $TiO_2$ ) (Kim vd., 2008), hidroksiapatit (HA) (Park vd., 2008), zirkonya ( $ZrO_2$ ) (Bacchelli vd., 2009) ve silika ( $SiO_2$ ) (Guo vd., 2015) tozlarıdır. Kumlamanın temel hedefi yüzey morfolojisini değiştirerek pürüzlü bir yüzey eldesi sağlamaktır. Pürüzlülük değeri; kullanılan kumun boyutuna, kum püskürtme basıncına, yüzey ile nozul arası mesafeye ve işlem süresine bağlıdır. İmplantlar için yüzey pürüzlülüğü (Ra) genel olarak 0,3-3  $\mu m$  arasında farklılık gösterir. Kumlama işleminin yan etkisi olarak ifade edebileceğimiz bir dezavantajı malzeme yüzeyinde kum taneciklerinin kalma riskidir. Kumlama sonrası yapılan temizleme, asidik işlem ve sterilizasyona rağmen bazen bu partiküllerin

malzeme yüzeyine gömülü olarak kalması söz konusu olabilir. Tabii bu yabancı kalıntılar fizyolojik çevrede titanyumun korozyon direncini düşürebilir, dokuların etrafına yerleşerek osseointegrasyonu olumsuz etkileyebilir (Aparicio vd., 2003). Wennerberg ve diğerleri (1996) tarafından  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ile kumlanarak üretilen implantların in vivo çalışmalarında, kemik - implant temasında benzer değerler vermesine rağmen, düz yüzeyli dental implantlara göre tork kuvvetinin ve biyomekanik bağlanmanın önemli ölçüde arttığı görülmüştür (Abron vd., 2001).

Kuvvetli asitler ( $H_2SO_4$ , HCl, HF) ile yapılan dağlama işlemi, titanyum dental implant yüzeylerinin pürüzlendirilmesinde ve kumlama sonrası yüzeydeki kalıntıların giderilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Osseointegrasyonu büyük ölçüde artıran asidik işlem ile yüzeyde farklı boyutlarda mikro çukurlar oluşur (Massaro vd., 2002).  $H_2SO_4$  ve HCl asitlerinin karışımı ile titanyum yüzeyine yapılan ikili asitleme (dual acid-etching) işlemi neticesinde osteojen hücreler ve fibrinin bağlanması yoluyla osteokondüktif süreç hızlanır. Bu da implant yüzeyinde doğrudan kemik oluşumuna sebep olur (Park ve Davies, 2000). Son yıllarda asidik işlem ile üretilen yüzeylerin kemik neoformasyonu ve hücre adhezyonunu artırması geliştirilmiştir (Le Guéhennec vd., 2007). Diğer taraftan, implantın yorulma dayanımını azaltan, yüzeyde mikro çatlakların oluşumuna yol açan asidik işlem titanyumun hidrojen gevrekliğine yol açabilir. Titanyum tarafından hidrojenin adsorpsiyonu biyolojik çevre içinde de meydana gelebilir. Titanyumun hidrojen gevrekliği gevrek hibrid fazın oluşumu ile alakalı olup, bu durum dental implantın kırılmasını doğuran titanyumun duktilitesinin azalmasına yol açar.

Asidik dağlama, günümüzde araştırılan ve uygulaması olan bir önceki paragrafta da bahsettiğimiz üzere önemli implant yüzey işlemlerinden biridir. Dağlama için kullanılan farklı asit tipleri arasında hidroflorik asit (HF) etkili yüzey pürüzlülüğü oluşturması ve biyouyumluluğu artırması gibi birçok avantaja sahiptir. Ayrıca bu işlem kaplama olmayan bir yöntem olduğu için, aşınma parçacıklarının

oluşma riski düşüktür. Ticari implantlar yüzey işlemler uygulanarak çeşitli pürüzlülük karakteristiklerine sahip olarak üretilirler, Mikro ve nanometre ölçeğinde yüzey pürüzlülüğünün etkisi yoğun çalışılan konulardan biridir (Gittens vd., 2011; Liu vd., 2004).

Bu çalışmada, kumlanmış ve kumlanmamış saf titanyum numuneler farklı oranlarda hazırlanan HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asit karışımında dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işleminde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kum kullanılmıştır. İşlem gören örneklerin yüzey özellikleri incelenmiş ve farklılıklar tartışılmıştır.

## Deneysel çalışmalar

Altlık malzeme olarak saf titanyum (Cp-Ti, Gr2) malzeme kullanılmıştır. 25 mm çapında yuvarlak kesitli titanyum çubuktan 5 mm

kalınlığındaki numuneler şerit testere yardımıyla kesilerek hazırlanmıştır. Deneysel çalışmaların öncesinde her bir numune 80 - 1200 grit arasındaki SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Dağlama işleminden önce numuneler etanol, aseton ve saf su karışımında ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Dağlama işlemi farklı konsantrasyonlarda hidroklorik asit (HCl) ve sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) karışımı içinde gerçekleştirilmiştir. Dağlama prosesine ilişkin bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Dağlama işlemi 50 ml beher içinde, 60 °C’de 10 dakika boyunca yürütülmüştür. Kumlama işlemi ise 50 µm boyutundaki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kum püskürtme işlemi ile yapılmıştır (Şekil 1). Bu işlem, Reitel marka Sanduret 63 2K model kumlama cihazında, bir kompresör yardımıyla 3-3,2 bar çalışma basıncında gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Dağlama işlemine dair bilgiler

İşlem	Dağlama					Kumlama + Dağlama				
	D13	D12	D11	D21	D31	KD13	KD12	KD11	KD21	KD31
HCl	1	1	1	2	3	1	1	1	2	3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	2	1	1	1	3	2	1	1	1



*Şekil 1. Kumlama işlemi*

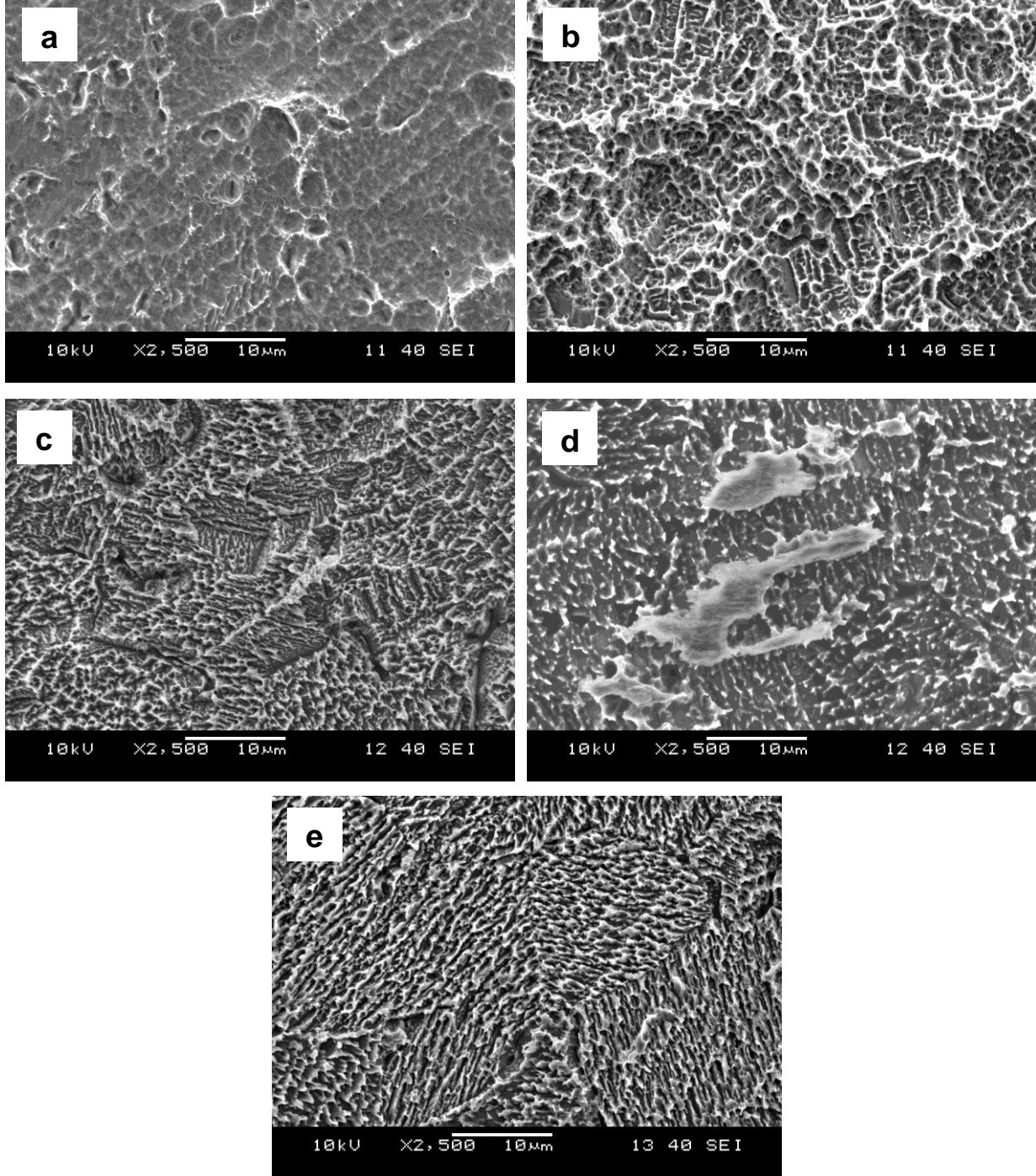
Yüzey modifikasyon işlemleri sonrasında titanyum örneklerin yüzey morfolojileri JEOL marka JSM- 6060 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Pürüzlülük ölçümleri Ambios marka, XP-2 yüksek çözünürlüklü yüzey profilometresi modeli cihazında yapılmıştır.

## Sonuçlar ve tartışma

Farklı karışım oranlarında hazırlanan HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asidik çözeltisi içinde titanyumun dağlanması sonucu oluşan yüzey morfolojilerine ait sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. Yüksek H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranında gerçekleştirilen dağlama işleminde D13 numunesinde diğer yüzeylere göre mikro çukurların (micro pit) oluşmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 2a). H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının düşürüldüğü HCl oranının artırıldığı çözelti içinde gerçekleştirilen dağlama sonucunda ise D12 numunesinin tüm yüzeyinde yoğun bir mikro çukur yapının oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 2b). Yüzeydeki bu mikro çukurların çapı ~ 0,5-3 µm arasında değişmektedir. HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının 1:1 olduğu çözelti içinde yapılan dağlama işleminde mikro porların çapının düştüğü ve köşeli por formunun oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 2c). HCl oranının H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>’e göre iki kat kullanıldığı çözeltide yapılan dağlama işleminde ise mikro çukur derinliğinin düştüğü ve por yapısının tam olarak oluşmadığı görülmektedir (Şekil 2d).

HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranının 2:1 olduğu asit çözeltisinde gerçekleştirilen dağlama işleminde çok yoğun

farklı yönlenmeler gösteren mikro çukurların varlığı tespit edilmiştir (Şekil 2e).



Şekil 2. Dağlanmış numunelere ait yüzey morfolojileri (a) D13 (b) D12 (c) D11 (d) D21 ve (e) D31

Asidik dağlama işlemine tabi tutulan titanyum numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Zımparalama sonrası işlem görmeyen yüzeyin pürüzlülük değeri Ra = 0,13 µm olduğu düşünülürse dağlama işleminin

yüzey pürüzlülüğünü artırdığını söyleyebiliriz. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri Ra = 0,51 µm ile D21 numunesinde, yani HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> =2/1 çözeltisinde dağlanan örnekte ölçülmüştür. Buna karşın en düşük pürüzlülük değeri ise

HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1/3 asit çözeltisi içinde yapılan dağlama neticesinde D13 numunesinde tespit edilmiştir. Genel olarak 0,50 µm' nun altında

ölçülen yüzey pürüzlülük değerinin implantlar için belirtilen 0,5 - 2 µm aralığının altında olduğu fark edilmektedir.

**Tablo 2.** Dağlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

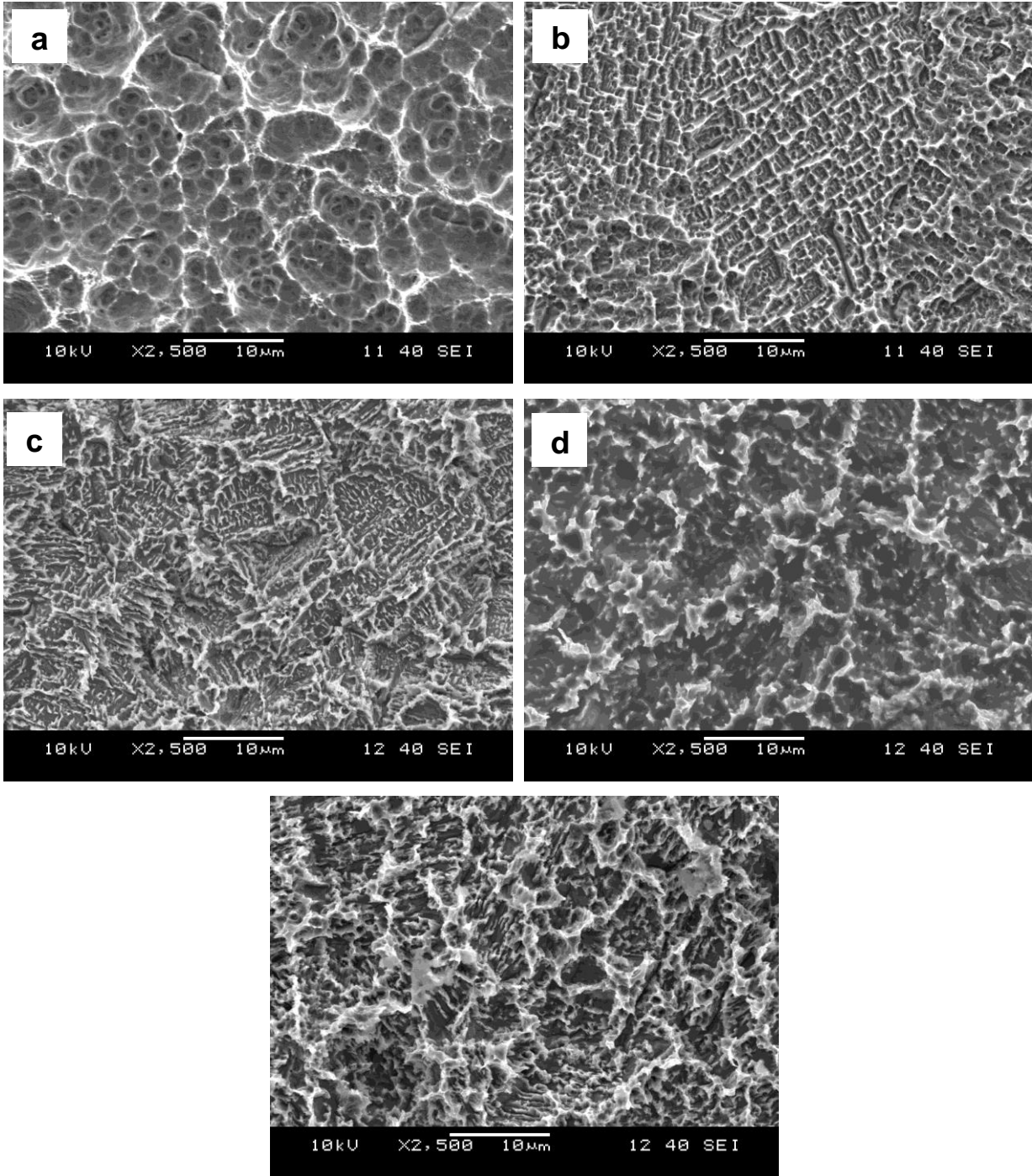
	D13	D12	D11	D21	D31
Ra (µm)	0.29 ± 0.01	0.38 ± 0.01	0.46 ± 0.07	0.51 ± 0.06	0.50 ± 0.13
Rq (µm)	0.44 ± 0.02	0.50 ± 0.01	0.68 ± 0.14	0.78 ± 0.08	0.73 ± 0.17
Rt (µm)	5.04 ± 1.59	4.84 ± 0.73	7.34 ± 2.06	6.13 ± 0.33	5.34 ± 1.13

Yüzey pürüzlülüğünün artışı ile titanyum implantın biyomekanik bağlanma ve osseointegrasyon hızında bir artış gözlemlenmektedir (Patil ve Bhongade, 2016). Dolayısıyla pürüzlülük değerinin artırılması amacıyla deneysel çalışmaların ikinci aşamasında dağlama öncesi kuşlama (sand-blasting) işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda dağlamanın doğrudan yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkisi tespit edilmiştir. Titanyum numuneler, 50 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile gerçekleştirilen kuşlama işleminin sonrasında farklı konsantrasyonda asit çözeltilerinin (HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) içinde dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu iki adımlı işlemin sonrasında oluşan yüzey morfolojileri Şekil 3'de verilmiştir. Kuşlama işleminin yüzey topografyasında önemli bir değişikliğe yol açtığını söyleyebiliriz. Diğer taraftan asidik işlem kuşlama morfolojisine daha homojen bir form kazandırmıştır. HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1/3 çözeltisi içinde gerçekleştirilen dağlama sonucunda yüzey morfolojisi diğerlerine nazaran farklılık sergilemektedir (Şekil 3a). Yüzeyde farklı boyutlarda dağılım gösteren çukurlar ve porlar oluşmuştur. HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1/2 çözeltisinde dağlanan KD12 numunesinde ise daha yoğun, homojen ve küçük çapta mikro çukurların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3b). HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 1/1 olduğu KD11 numune yüzeyinde ise sadece dağlama yapılan D11 yüzey morfolojisine benzer bir yapı oluşmuştur. (Şekil 3c). HCl oranının H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>'e göre iki kat fazla kullanıldığı çözeltide gerçekleştirilen dağlama işleminde ise yoğun mikro çukur yapının oluşmadığı daha kaba bir forma sahip pürüzlülükte bir morfolojinin oluştuğunu söyle-

yebiliriz (Şekil 3d). HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 3/1 olduğu asidik çözelti içinde gerçekleştirilen dağlama sonucu köşeli, girinti ve çıkıntının hakim olduğu bir morfoloji gözlemlenmiştir (Şekil 3e).

Kuşlama ve sonrasında asidik dağlama yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Yüzey pürüzlendirme yöntemlerinden biri olan kuşlama işleminin yüzey pürüzlülüğünün artırılmasında etkili bir yöntem olduğu sonuçlardan görülmektedir. En yüksek pürüzlülük değeri KD11 numunesinde R<sub>a</sub> = 2,13 µm olarak ölçülürken, en düşük pürüzlülük değeri ise R<sub>a</sub> = 0,9 µm olarak KD12 numunesinde tespit edilmiştir. Kuşlama işlemi sadece asidik işlem gören yüzeylere göre pürüzlülük değerini ortalama üç kat artırmıştır. Kuşlama + dağlama sonucu elde edilen değerler, ideal yüzey pürüzlülüğü (0,5 - 2 µm) değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça tutarlı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; implantın yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyindeki por yapısı, implantın kemik-temas yüzey alanının artmasına ve implant uygulamasında iyileşme zamanına (healing time) yardımcı olmaktadır (Hung vd., 2017). Yüzey modifikasyon teknikleri titanyum implantların performansını artırmak için halen büyük potansiyele sahiptir. Çünkü implant-kemik arasındaki etkileşimi hızlandırmak, iyileşme zamanını erkene almak, kararlı bir integrasyon sürecinin sağlanması, vücut sıvısına karşı korozyon direncinin artırılması ve uzun süreli implantın kullanılmasını sağlayacak yeni çalışmalar halen popülerliğini koruyan konular arasındadır.



Şekil 3. Dağlanmış numunelere ait yüzey morfolojileri (a) KD13 (b) KD12 (c) KD11 (d) KD21 ve (e) KD31

Tablo 3. Kumlama+dağlama yapılmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

	KD13	KD12	KD11	KD21	KD31
Ra (µm)	1.01 ± 0.03	0.90 ± 0.02	2.13 ± 0.12	1.29 ± 0.05	0.98 ± 0.02
Rq (µm)	1.28 ± 0.02	1.13 ± 0.03	2.59 ± 0.12	1.64 ± 0.08	1.24 ± 0.03
Rt (µm)	10.51 ± 0.3	7.69 ± 1.16	14.32 ± 0.48	11.41 ± 1.09	8.35 ± 0.30

## Sonuç

Sonuç olarak, farklı karışım oranlarında hazırlanan HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asit çözeltisinin dağlama işleminde titanyumun yüzey özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu asidik işlem, kumlanarak yüzeyi pürüzlendirilmiş titanyum numunelere de uygulanmıştır. HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> oranındaki değişimin titanyumun yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğüne doğrudan etki ettiği gözlemlenmiştir. Dağlama prosesine bağlı olarak yüzey morfolojisinde farklı boyut ve şekillerde mikro çukurların oluştuğu tespit edilmiştir. Asidik dağlama işlemine nazaran kumlanmanın yüzey pürüzlülüğünde önemli bir rol oynadığı net bir şekilde görülmüştür. Kumlanan yüzeyler dağlama sonrasında daha üniform bir morfolojiye sahip olmuştur. İmplant yüzeyler için istenen optimum yüzey pürüzlülüğü değerlerine kumlama ile ulaşılmıştır.

## Kaynaklar

- Abram, A., Hopfensperger, M., Thompson, J. ve Cooper, L.F., (2001). Evaluation of a predictive model for implant surface topography effects on early osseointegration in the rat tibia model, *Journal of Prosthetic Dentistry*, **85**,1, 40-46.
- Aparicio, C., Gil, F.J., Fonseca, C., Barbosa, M. ve Planell, J.A., (2003). Corrosion behaviour of commercially pure titanium shot blasted with different materials and sizes of shot particles for dental implant applications, *Biomaterials*, **24**, 2, 263-273.
- Bacchelli, B., Giavaresi, G., Franchi, M., Martini, D., De Pasquale, V., Trirè, A. ve Ruggeri, A., (2009). Influence of a zirconia sandblasting treated surface on peri-implant bone healing: an experimental study in sheep, *Acta biomaterialia*, **5**, 6, 2246-2257.
- Ban, S., Iwaya, Y., Kono, H. ve Sato, H., (2006). Surface modification of titanium by etching in concentrated sulfuric acid, *Dental Materials*, **22**, 12, 1115-1120.
- Conforto, E., Caillard, D., Aronsson, B. O. ve Descouts, P., (2002). Electron microscopy on titanium implants for bone replacement after “SLA” surface treatment, *European Cells and Materials*, 3 (Supplement 1), 9-10.
- Gittens, R.A., McLachlan, T., Olivares-Navarrete, R., Cai, Y., Berner, S., Tannenbaum, R. ve Boyan, B.D., (2011). The effects of combined micron-/submicron-scale surface roughness and nanoscale features on cell proliferation and differentiation. *Biomaterials*, **32**, 13, 3395-3403.
- Guo, C. Y., Matinlinna, J.P., Tsoi, J.K.H. ve Tang, A.T.H., (2015). Residual Contaminations of Silicon-Based Glass, Alumina and Aluminum Grits on a Titanium Surface After Sandblasting. *Silicon*, 1-8.
- Hung, K.Y., Lin, Y.C. ve Feng, H.P., (2017). The Effects of Acid Etching on the Nanomorphological Surface Characteristics and Activation Energy of Titanium Medical Materials. *Materials*, **10**, 10, 1164.
- Kim, H., Choi, S.H., Ryu, J.J., Koh, S.Y., Park, J.H. ve Lee, I.S., (2008). The biocompatibility of SLA-treated titanium implants. *Biomedical Materials*, **3**, 2, 025011.
- Le Guéhennec, L., Soueidan, A., Layrolle, P. ve Amouriq, Y., (2007). Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration. *Dental materials*, **23**, 7, 844-854.
- Liu, X., Chu, P.K. ve Ding, C., (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, **47**, 3-4, 49-121.
- Massaro, C., Rotolo, P., De Riccardis, F., Milella, E., Napoli, A., Wieland, M. ve Brunette, D.M., (2002). Comparative investigation of the surface properties of commercial titanium dental implants. Part I: chemical composition. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **13**, 6, 535-548.
- McCracken, M., (1999). Dental implant materials: commercially pure titanium and titanium alloys, *Journal of prosthodontics*, **8**, 1, 40-43.

- Park, J.Y. ve Davies, J.E., (2000). Red blood cell and platelet interactions with titanium implant surfaces. *Clinical oral implants research*, **11**, 6, 530-539.
- Park, J.W., Jang, I.S. ve Suh, J.Y., (2008). Bone response to endosseous titanium implants surface-modified by blasting and chemical treatment: A histomorphometric study in the rabbit femur, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, **84**, 2, 400-407.
- Patil, P.S., ve Bhongade, M.L., (2016). Dental Implant Surface Modifications: A Review. *IOSR Journal of Dental and Medical Sciences* **15**, 10, 132-14.
- Perrin, D., Szmukler-Moncler, S., Echikou, C., Pointaire, P. ve Bernard, J.P., (2002). Bone response to alteration of surface topography and surface composition of sandblasted and acid etched (SLA) implants. *Clinical oral implants research*, **13**, 5, 465-469.
- Schweickl, H., Müller, R., Englert, C., Hiller, K.A., Kujat, R., Nerlich, M. ve Schmalz, G., (2007). Proliferation of osteoblasts and fibroblasts on model surfaces of varying roughness and surface chemistry, *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **18**, 10, 1895-1905.
- Wennerberg A, Albrektsson T, Albrektsson B, Krol J.J., (1996). Histomorphometric and removal torque study of screw-shaped titanium implants with three different surface topographies. *Clin Oral Implant Res.* **6**, 24-30.
- Wong, M., Eulenberger, J., Schenk, R. ve Hunziker, E., (1995). Effect of surface topology on the osseointegration of implant materials in trabecular bone, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **29**, 12, 1567-1575.
- Yang, G.L., He, F.M., Yang, X.F., Wang, X.X. ve Zhao, S.F. (2008). Bone responses to titanium implants surface-roughened by sandblasted and double etched treatments in a rabbit model, *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, **106**, 4, 516-524.



## The effect of different HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ratio of the acid etching process on the surface morphology and roughness of titanium

### Extended abstract

Titanium and its alloys have been widely used as biomedical materials in orthopedic and dental applications because of their high corrosion resistance, low density, high mechanical properties, and excellent biocompatibility. The most important factors that play an important role in the interaction of titanium implants with live bone tissue are surface properties. The surface morphology and roughness of the implant are the important factors of these properties. The aim of this work was to examine the effects of the etching process carried out in the acid solution with different HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ratios to the surface properties of the sandblasted and un-sandblasted pure titanium.

Samples with a 25 mm diameter and a 5 mm thickness were cut from commercially pure titanium (ASTM grade 2) cylindrical bar, and then mechanically polished with 80-grit to 1200-grit emery paper. After polishing process, the titanium samples were washed with acetone, ethanol and distilled water in an ultrasonic cleaner at room temperature for 15 minutes. Alumina particles (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) with 50 µm particle size was used for sandblasting. Etching process was performed in a mixture of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/HCl acids at different ratio. The surface morphology and microstructure of the samples were characterized by a scanning electron microscope (SEM). Surface roughnesses of the specimens were analyzed using a surface roughness tester.

Different surface morphologies were formed by etching of titanium in HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acidic solution prepared at different mixing ratios. It was observed that no micropores formed on the titanium surface, as a result of the etching process carried out in high concentration H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> containing acid solution. It has been determined that a dense micro-pit structure on the surface of the sample treated with etching process in the acid solution where the ratio of HCl was increased. These micro pits on the surface are between 0.5-3 µm. The highest surface roughness value ( $R_a=0.51$ ) was measured in a sample that was etched in a solution of HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> = 2/1. On the

other hand, the lowest roughness value was determined on the sample etched in the HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 1/3 acid solution.

Titanium samples were subjected to sandblasting treatment with 50 µm particles of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> followed by acid etching process in different concentrations of acid solutions (HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). The surface morphology generated by this two step process is examined. We can say that the sandblasting process leads to a significant change in surface topography. The acidic process gives a more homogeneous form to the sandblasted morphology. There are pits and pores scattered on the surface in different sizes. The surface roughness results obtained from the sandblasting+etching process were found to be quite consistent when compared with the ideal surface roughness values.

As a result, the effects of the etching process performed in the HCl/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution prepared at different mixing ratios on the titanium surface properties were investigated. In addition, this acidic process was applied to roughened titanium samples by sandblasting.

**Keywords:** Acid-etching, surface morphology, roughness, implant, sand-blasting



## Ferromolibden ve ferrobor takviyeli lazer kaplamaların aşınma karakteristiği ve mikroyapısı

**Hülya DURMUŞ**

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

E-mail: [hulya.durmus@cbu.edu.tr](mailto:hulya.durmus@cbu.edu.tr)

ORCID: 0000-0002-7270-562X

**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

**Canser GÜL\***

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

E-mail: [canser.gul@cbu.edu.tr](mailto:canser.gul@cbu.edu.tr)

ORCID: 0000-0002-1339-936X

**Melis YURDDAŞKAL**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Manisa, Türkiye.

E-mail: [melis.yurddaskal@cbu.edu.tr](mailto:melis.yurddaskal@cbu.edu.tr)

ORCID: 0000-0002-8774-3848

**Recep Onur UZUN**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Manisa, Türkiye.

E-mail: [r.o.uzun@cbu.edu.tr](mailto:r.o.uzun@cbu.edu.tr)

ORCID: 0000-0002-1042-0493

Geliş: 11.01.2019, Revizyon: 30.01.2019, Kabul Tarihi: 15.02.2019

### Öz

Lazer kaplama yöntemi ile kalıp yüzeylerinde aşınmaya dirençli bir tabaka oluşumu veya kalıpta meydana gelen bölgesel aşınmaların tamirini gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinin aşınma direncini geliştirmek amacıyla ferromolibden (FeMo) ve ferrobor (FeB) takviyeli demir esaslı kaplamalar lazer yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların aşınma direnci ball-on-disk aşınma testiyle tespit edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri hem optik mikroskop hem de taramalı elektron mikroskopu altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü sonucunda FeB takviyeli kaplamanın FeMo takviyeli kaplamaya göre daha yüksek sertliğe sahip olduğu görülmüştür. Artan kaplama sertliği aşınma direncini artırarak FeB takviyeli kaplamada daha az malzeme kaybı meydana getirmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kaplama, aşınma, sertlik, bor, molibden

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Aşınma, mekanik bileşenlerin yüzeylerinde kademeli olarak meydana gelen malzeme kaybı veya bozunma olarak tanımlanabilir. Günümüzde pahalı kalıpların, makine parçalarının veya ana gövdelerin aşınması büyük maddi kayıplara neden olmaktadır. Aşınan bu malzemelerin tribolojik özelliklerini geliştirmek ve meydana gelen aşınmayı önlemek için kullanılan çeşitli yüzey modifikasyon yöntemleri mevcuttur (Cay vd., 2011). Sert dolgu kaplamalar yüzeylerde farklı yöntemlerle oluşturulabilir. Bu yöntemlerden bazıları çeşitli fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme yöntemleri, plazma kaplamalar ve lazer kaplamalardır (Cay vd., 2011; Buytoz vd., 2013).

Lazer kaplama, dolgu malzemesinin yüksek güçlü lazer ışınmasıyla ergitilerek iş parçalarının yüzeylerine biriktirilmesi esasına dayanan verimliliği yüksek bir uygulamadır (Birger vd., 2011; Chandrasekar vd., 2016; Torims, 2013). Aşınmaya dayanıklı yeni bir yüzey oluşturulmasında veya aşınmış yüzeylerin onarılmasında yüksek yüzey kalitesi, düşük distorsiyon ve seyrelme meydana getiren lazer kaplama yöntemi oldukça uygundur (Birger vd., 2011; Torims, 2013). Lazer kaplama uygulaması, türbin kanatları, gaz türbini ve içten yanmalı motor parçaları gibi yüksek değerli bileşenlerin onarımının yanı sıra özellikle kalıp yüzeylerinin kaplanması tercih edilmektedir (Torims, 2013; Dai vd., 2016). Kalıpların hasarı, servis ömrünü ciddi biçimde etkileyen yüzey aşınmasından kaynaklanmaktadır. Aşınmış kalıbın yenisiyle değiştirilmesi kaynak israfına neden olur. Sert dolgu kaplamaların lazerle uygulanması diğer yöntemlere göre çeşitli avantajlara sahiptir. Kaplamaları lazer kaynak yöntemiyle oluşturulması, diğer yöntemlerden farklı olarak altlık malzemesine daha az ısı geçişi ve dolayısıyla daha sert ve dayanımı yüksek bir kaplama eldesini mümkün kılmaktadır (Chen vd., 2012). Ayrıca, kaplama malzemesi ile kalıp malzemesi arasında %100 metalurjik bağ oluşturarak kalıbın aşınmış yüzeyini bölgesel

olarak onarmaktadır (Dai vd., 2016; Birger vd., 2011).

Lazer kaplama ile yapılan koruyucu kaplamalar kalıbın aşınmış yüzeylerini onarıırken, bu bölgelerde sert faz oluşturuıcı çeşitli takviye tozlar kullanılmasıyla da bu yüzeyleri aşınmaya daha dayanıklı hale getirebilmektedir. Demir (Fe) elementi içerikli kaplamalar düşük maliyeti, yüksek sertlikleri ve aşınma dayanımları nedeni ile tercih edilmektedir. Chen vd., 2012, yaptıkları çalışmada Ti altlıklar üzerine Fe bazlı kaplamalar yapmışlardır. Oluşan tabakanın Fe, Fe<sub>2</sub>Ti, Fe<sub>2</sub>B, Fe<sub>3</sub>Si, Ti<sub>2</sub>Ni ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fazlarını içerdiği ve tabakanın metalurjik olarak tamamen altlık malzemesine bağlandığı görülmüştür. Kaplamaların orta derecede yapışkan ve aşındırıcı karakteristikte aşındığını ve aşınma dayanımlarında büyük ölçüde bir artış meydana geldiğini göstermişlerdir.

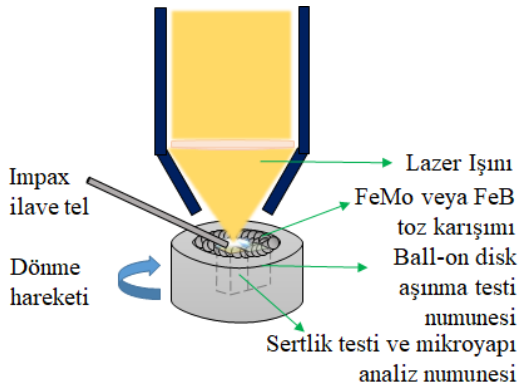
Fe içerikli kaplamalara katkı olarak bor elementi veya karbür yapıcı elementler eklendiğinde karbürler veya borürler oluşur. Bunlar yüksek sertlikleri nedeniyle matris içinde dağıldıklarında aşınma dayanımlarını artırır (Torims, 2013). Kobalt, krom, molibden gibi elementler karbon ile birlikte yapıda karbür fazları oluşturan elementlerin başında gelmektedir (Zhang vd. 2018). Molibden (Mo) elementi, MoC ve Mo<sub>2</sub>C şeklinde karbürler oluşturarak, sertliğin, aşınma direncinin ve sıcaklık dayanımının artmasına katkı sağlamaktadır (Wang vd. 2008; Badisch ve Mitterer 2003). Bor ilavesi de benzer şekilde kaplamanın sertliğini ve aşınma direncini artırmaktadır (Buytoz vd., 2013). Yoo vd., 2006 yılında yaptıkları çalışmada, Satellite 6 alaşımına Fe içerikli geleneksel sert dolgu kaplamalar uygulamıştır ve artan bor içeriğinin tane boyutlarını küçülttüğünü, aşınma sonrası hacim kayıplarını azalttığını tespit etmiştir (Yoo vd., 2006).

Bu çalışmada, AISI4140 çelik numunelerin yüzeyine Nd-YAG lazer kaynak yöntemi kullanılarak FeMo ve FeB tozlarından oluşan sert dolgu alaşımları kaplanmıştır. Kaplamaların, yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırması amaçlanmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Lazer kompozit kaplamaların üretimi

Altlık malzemesi olarak AISI 4140 çeliğinden 10 mm çapında ve 5 mm yüksekliğinde, numuneler hazırlanmıştır. FeB ve FeMo tozları, her birinden 0,27 g olacak şekilde altlık malzemesinin üzerine serilmiştir. FeMo tozuna, lazer kaynak uygulaması sırasında karbür oluşumunu sağlaması için 0,03 g grafit tozu ilave edilmiştir. Tozların işlem esnasında yüzeyden ayrılmaması için ön işlem olarak altlık malzemesinin kenarına bir sıra halinde dolgu teli ile bariyer yapılmıştır. Oluşan havuzun içerisine tozlar ilave edilerek tozların üzerine ticari dolgu teliyle (AISI P20) birlikte lazer ışını uygulanmıştır. Yaklaşık 0,8 mm kalınlığında kaplamalar elde edilmiştir. FeB ve FeMo takviyesinin etkisini belirlemek için takviyesiz durumda referans kaplama numunesi de üretilmiştir.



Şekil 1. Lazer kaplama uygulamasının şematik gösterimi

### Mikroyapı incelemeleri

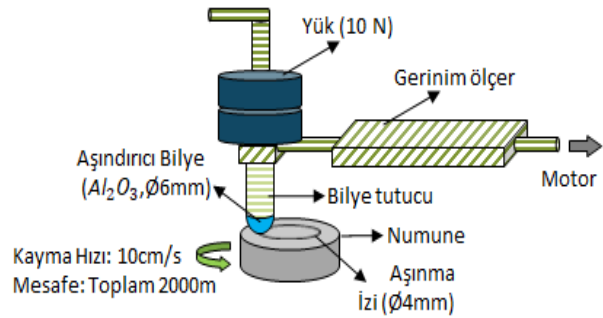
Zımparalanıp parlatılan kaplama numuneleri Kalling's çözeltisi ile dağlanmış. Kaplamaların mikroyapı ve morfolojik incelemeleri için optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve elementel analiz için enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır.

### Sertlik ve aşınma testleri

Kaplamaların ve ana malzemenin sertliği Vickers (HV1) sertlik metodu ile ölçülmüştür. Her bir numuneden üç ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır. Kesit boyunca mikro

sertlik dağılımları Vickers metodu ile 100 g-kuvvet yük altında gerçekleştirilmiştir.

FeMo ve FeB takviyelerle kaplanmış numunelerin aşınma testleri için CSM Instruments ball-on-disk aşınma test cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). Kuru ortamda ve oda sıcaklığında gerçekleştirilen aşınma testlerinde karşı eleman olarak 6 mm çapında alümina ( $Al_2O_3$ ) bilye kullanılmıştır. Test süresince uygulanan yük 10 N, kayma hızı 10 cm/s, toplam kayma mesafesi 2000 m ve aşınma çapı 4 mm olarak belirlenmiştir. Hacimsel kaybın belirlenmesi için her 400 metrede bir yüzey profilometre ile aşınma izinin topografik ölçümü yapılmıştır. Bu ölçüme göre hacimsel kayıplar hesaplanmıştır.



Şekil 2. Ball-on-disc aşınma testinin şematik gösterimi

## Sonuçlar ve Tartışma

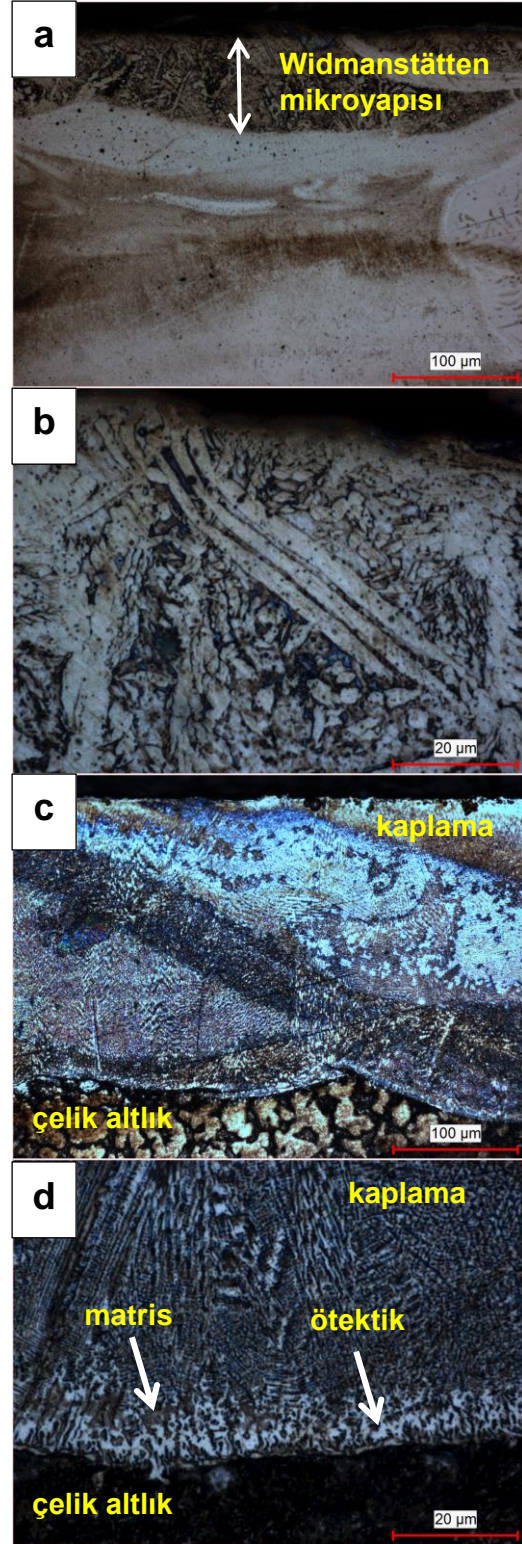
### Mikroyapı incelemeleri

Lazer kaplama ile oluşturulan kaynak dikişlerinin makro görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. Kaynak dikişleri birbiri üzerine bindirilerek FeB ve FeMo takviyeli kompozit kaplamalar oluşturulmuştur.



**Şekil 3.** Takviyesiz lazer kaplama tabakasının üstten stereo mikroskop görüntüsü.

Kaplamaların optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4), FeMo takviyeli kaplamada iğnemi ve plaka benzeri mikroyapısal bileşenler tespit edilmiştir. Yaklaşık 80 µm kalınlığında bir bölgeyi kapsayan bu yapının Widmanstätten ferrit olduğu düşünülmektedir. Ötektoid öncesi ferrit, iğnemi ya da plaka benzeri taneler içeren morfoloji sergilediğinde bu yapı sıklıkla Widmanstätten ferrit olarak adlandırılmaktadır. Widmanstätten ferrit oluşumuna, haddelenmiş çeliklerde, hızlı soğutulmuş çeliklerde, kaynak metallere veya kaynaklı yapıların ısı tesiri altındaki bölgelerinde rastlanabilmektedir. Ferritin, kaba östenit taneleri boyunca tamamen büyümesi güçleşir ve dolayısıyla Widmanstätten ferrit oluşumu, kaba östenit taneleri tarafından desteklenir. Bir diğer faktör ise soğuma hızıdır. Kaba östenit taneleri ile nispeten hızlı soğumanın kombinasyonu Widmanstätten ferrit oluşumuna eğilimi artırır (Bodnar ve Hansen, 1994). İnce tane yapısı, ince karbür/nitrür çökeltileri ile östenit tanelerinin büyümesinin engellenmesi sonucunda meydana gelir (Maropoulos vd., 2007). Lazer kaplama esnasında, yoğunluğu demir esaslı kaynak metaline göre daha yüksek olan FeMo tozları kaplamanın orta ve alt bölgelerinde kalarak Şekil 4a'da görüldüğü gibi ince taneli karbür çökeltileri oluşturmuştur. Karbürlerin tercihen kaplamanın orta bölgesinde oluşması sebebiyle yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen karbür eksikliğinin, östenit tane boyutunda irileşmeye sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca dış yüzeyde soğuma hızının daha yüksek olabileceği göz önüne alındığında Widmanstätten ferrit oluşumunu destekleyen tüm koşullar sağlanmaktadır.



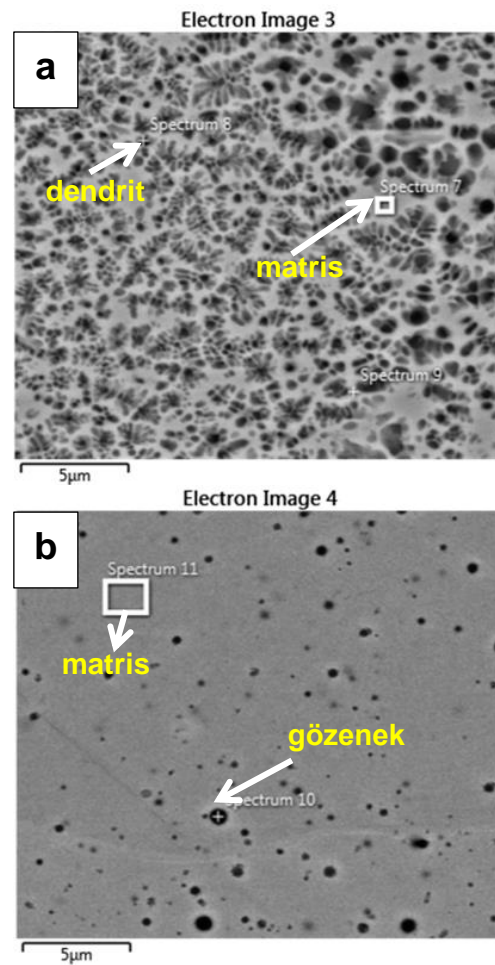
**Şekil 4.** Kaplamaların mikroyapı görüntüleri: a) FeMo takviyeli, b) FeMo takviyeli kaplamada Widmanstätten ferrit oluşumu, c-d) FeB takviyeli

FeB takviyeli kaplamada, dendrit kolları arasında çökelen fazlar görülmektedir (Şekil 4d). Du, 2013, yaptığı çalışmada Ti, B ve Fe içeren numuneler ile yaptıkları çalışmada dendritik matris içine dağılmış siyah granül benzeri fazlara rastlanmıştır. Bu fazların yüksek miktarda Ti ve B elementleri içeren ara bileşikler nedeniyle oluştuğu tespit edilmiştir. Fu vd., 2015, Fe esaslı kaplamalarda mikroyapıların kompozisyon ve oluşum mekanizmalarını araştırmışlardır. Bu kaplamaların esas olarak dendrit ve ötektik içeren mikroyapılara sahip olduğunu gözlemlemiştir. Yüksek katılma oranlarında, önce dendritler oluşmaktadır. Devamında ötektik oluşumu gerçekleşmektedir. Dendrit kolları arasında çökelen fazların bor içeriğinin matrisin bor içeriğinden daha yüksek olduğu EDX analizleri ile ortaya çıkarılmıştır (Şekil 5, Tablo 1). FeMo takviyeli kaplamanın EDX analizinde oksijene rastlanmıştır (Tablo 1). Bu durum kaplama yüzeyinde oksit oluşumunu işaret etmektedir.

### Sertlik testi

Kaplamaların kesitinden alınan mikro sertlik değerleri Şekil 6'daki grafikte görülmektedir. FeB takviyeli kaplamanın sertliği kesit boyunca homojene yakın bir dağılım sergilerken, FeMo takviyeli kaplamanın sertliği kaplama yüzeyinde ve altlık malzemesine yakın bölgelerde göreceli olarak düşük, kaplamanın orta bölgelerinde ise daha yüksektir. FeMo takviyeli kaplamanın kesitten alınan mikroyapı görüntüsü incelendiğinde, kaplamanın üst yüzeye yakın bölgesinde kaba taneli bir mikroyapı gözlenirken, orta bölgelerinde ince taneli çökeltilerin bulunduğu tespit edilmiştir. Molibdenin yoğunluğu  $10,23 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Gasik, 2013). Ağırlıkça %60-65 oranında molibden içeren FeMo ferro alaşımının yoğunluğu ise yaklaşık  $9 \text{ g/cm}^3$  olarak hesaplanmaktadır. Lazer kaplama esnasında ergiyen demir esaslı kaynak telinin yoğunluğu FeMo alaşımına ve molibdene kıyasla daha düşük yoğunlukta olduğundan yüzeye çıkma eğilimi sergilemiştir. Yoğunluğu nispeten yüksek olan molibdenin ise yüzeyin altında kalarak bu bölgede ince karbürler oluşturup çökeldiği düşünülmektedir. Bu nedenle orta bölgede mikro sertlikte artış

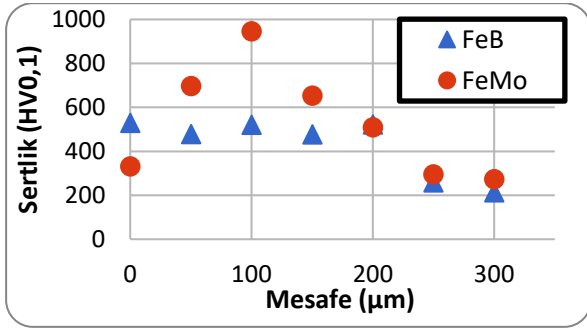
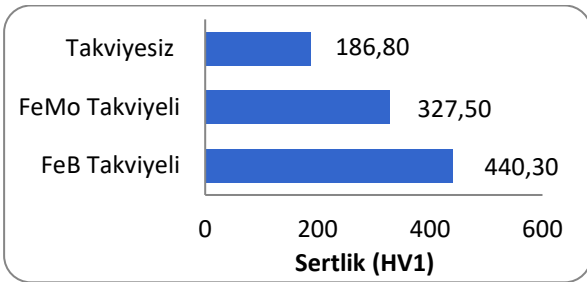
meydana gelmiştir. Altlık malzemeye yakın bölgede sertliğin tekrar düşmesinin sebebi ise seyrelmedir. Seyrelme, altlık malzemesinin kaplama malzemesi içerisindeki oranı olarak tanımlanmaktadır (Balasubramanian vd., 2009). Aslında, alt tabaka ile iyi bir yapışmayı garanti etmek için asgari bir karışım seviyesi gerekli olsa da, aşırı miktarda seyrelme kaplamanın özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir (Zanzarin vd., 2016). Seyrelmenin etkisi FeMo takviyeli kaplamada belirgin olarak görülmektedir. Bu kaplamanın altlık malzemesine yakın bölgesinde sertlikte düşüş meydana gelmiştir (Şekil 6).



Şekil 5. Kaplamaların SEM-EDX analizleri a) FeB, b) FeMo

**Tablo 1.** Numunelerin EDX sonuçları

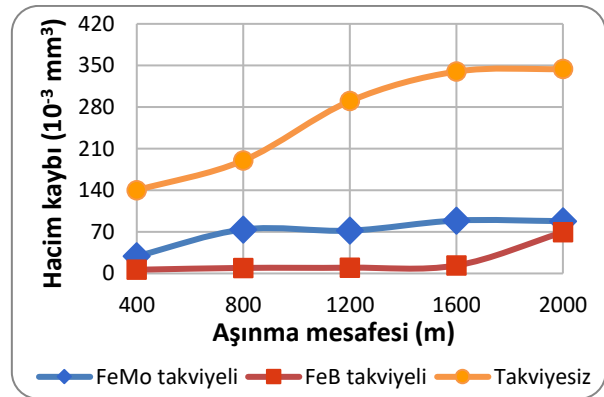
Element	C	Si	Cr	Fe	Ni	B	Mo	O	Mn
Spektrum 7	3,24	0,46	14,82	71,46	3,90	6,12	-	-	-
Spektrum 8	4,09	0,41	14,41	69,40	3,64	8,06	-	-	-
Spektrum 9	4,90	0,42	14,28	66,96	3,68	9,77	-	-	-
Spektrum 10	3,79	3,02	14,91	52,53	4,67	-	7,17	10,01	3,90
Spektrum 11	3,10	4,04	14,83	49,77	4,73	-	7,69	11,41	4,43

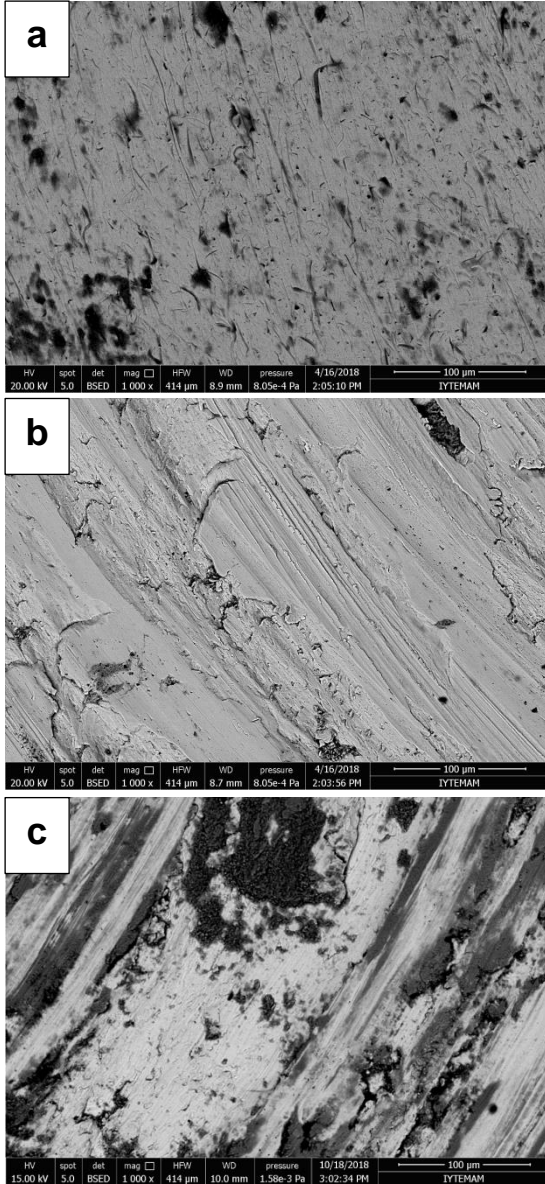
**Şekil 6.** Takviyeli kaplamaların kesitten mikrosertlik dağılımı**Şekil 7.** Kaplamaların ortalama sertlik değerleri

Kaplamaların ortalama sertlik değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Takviyesiz durumdaki kaplamanın ortalama sertlik değeri 186,8 HV olarak tespit edilmiştir. FeMo ve FeB ilave edilerek üretilen kaplamaların ortalama sertlik değerleri ise sırasıyla 327,5 HV ve 440,25 HV olarak ölçülmüştür. Bor ilavesinin yüzey sertliğini artırmada molibdene göre daha etkili olduğu görülmüştür. FeMo ilavesiyle yüzey sertliği yaklaşık 1,75 kat artarken FeB ilavesiyle 2,36 kat artmıştır.

### Aşınma testi

Kaplamaların aşınma testi sonucunda hacimsel malzeme kaybına ait grafik incelendiğinde FeB içeren kaplamanın daha iyi aşınma direnci sergilediği görülmektedir (Şekil 8). FeMo içeren kaplama, mesafeye bağlı olarak malzeme kaybında artış eğilimi sergilemektedir. Buna karşın FeB içeren kaplama, aşınma yolunun 1600 metresine kadar hacimsel malzeme kaybında çok az değişim göstererek 2000 metrede bir anda malzeme kaybına uğramıştır. En fazla malzeme kaybı sadece dolgu teli ile üretilen takviyesiz kaplamada meydana gelmiştir. Artan kaplama sertliğinin aşınma direncini artırdığı tespit edilmiştir. Luyckx ve Love, 2004 WC takviyeli kobalt esaslı alaşımlarında abrazyon direncinin, alaşımın artan sertliği ile birlikte parabolik olarak arttığını gözlemlemişlerdir (Luyckx ve Love, 2004). Bu çalışmada, FeB takviyesi ile diğer kaplamalara kıyasla en yüksek sertlik değerine ve dolayısıyla aşınma direncine ulaşılmıştır.

**Şekil 8.** Takviyesiz, FeMo ve FeB takviyeli kaplamaların hacim kayıpları



**Şekil 9.** 2000 m sonrası kaplamaların aşınma yüzeyi: a) FeB takviyeli kaplama, b) FeMo takviyeli kaplama, c) takviyesiz kaplama

Aşınma testi sonrasında aşınma izinden ölçülen mikro sertlik değerlerinin ortalaması FeB takviyeli, FeMo takviyeli ve takviyesiz durumdaki kaplamalar için sırasıyla 765,7 HV, 635,7 HV ve 403 HV olarak hesaplanmıştır. Kaplamaların aşınma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 9'da verilmiştir. FeB takviyeli numunede süreksiz ve derin olmayan aşınma izlerine rastlanmıştır. Aşınma esnasında meydana gelen pekleşme ile aşınma bölgesinde sertlik 1,7 kat artarak 765,7 HV değerine yükselmiştir. Bu nedenle FeB takviyeli

kaplamada aşınma izleri çok derin değildir. Buna karşın, yüzey sertliği Widmanstatten mikroyapısı nedeniyle 300 ila 350 HV arasında olan FeMo takviyeli kaplamada daha derin aşınma oyukları ve sürekli aşınma çizgileri meydana gelmiştir. FeMo takviyeli kaplamada aşınma sonrası sertliğin yaklaşık 1,9 kat yükselmesi, düşük sertlikteki yüzeye yakın bölgenin yüksek oranda plastik deformasyona uğrayarak pekleşmesidir. Benzer aşınma yüzeyi ve yüksek oranda plastik deformasyon takviyesiz kaplamada da gözlenmiştir.

## Sonuçlar

Lazer kaynak yöntemi ile üretilen kaplamaların, çelik altlık malzemesi ise metalurjik bağ oluşturabildiği görülmüştür. FeB ve FeMo takviyesiyle lazer kaplamaların sertlik ve aşınma dirençlerinin artırılabilirliği deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. FeB takviyeli kaplamada kesit boyunca homojene yakın bir mikroyapı elde edilirken, FeMo takviyeli kaplamanın dış katmanında yaklaşık 80 µm kalınlığında Widmanstatten ferrit mikroyapısı gözlenmiştir. FeB takviyeli kaplama, homojene yakın mikroyapı sergilemesi nedeniyle mikro sertlik dağılımında birbirine çok yakın sertlik değerleri elde edilmiştir. FeMo takviyeli kaplamada ise Widmanstatten ferrit oluşumu nedeniyle dış katmanda daha düşük, orta kısımlarda ise daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır.
2. En yüksek sertlik değeri FeB takviyeli kaplamada elde edilmiştir. FeB içeren kaplamanın sertliği takviyesiz kaplamaya göre ise yaklaşık 2,4 kat artış göstermiştir. Artan kaplama sertliği, hacimsel aşınma kaybını azaltmıştır. En yüksek aşınma kaybı takviyesiz kaplamada meydana gelirken, en yüksek aşınma direncini FeB takviyeli kaplama sergilemiştir.
3. FeMo takviyeli kaplamanın ve takviyesiz kaplamanın aşınma yüzeylerinde süreklilik sergileyen abrazyif aşınma çizikleri ve derin oyuklar oluşurken, FeB takviyeli



kaplamada süreksiz aşınma izleri gözlenmiştir. FeMo takviyeli kaplamada daha fazla aşınma meydana gelmesinin sebebi, dış tabakada oluşan düşük sertlikteki Widmanstätten ferrit fazıdır. Aşınma esnasında gerçekleşen plastik deformasyon sebebiyle aşınan bölgede sertlik artmıştır.

## Kaynaklar

- Badisch, E., Mitterer, C., (2003). Abrasive wear of high speed steels: Influence of abrasive particles and primary carbides on wear resistance, *Tribology International*, 36(10), 765-770.
- Balasubramanian, V., Varahamoorthy, R., Ramachandran, C.S., Muralidharan, C., (2009). Selection of Welding Process for Hardfacing on Carbon Steels Based on Quantitative and Qualitative Factors, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 887-897.
- Bodnar, R.L., Hansen, S.S., (1994). Effects of austenite grain size and cooling rate on Widmanstätten ferrite formation in low-alloy steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 25(4), 665-675.
- Birger, E.M., Moskvitin, G.V., Polyakov, A.N., Arkhipov, V.E., (2011). Industrial laser cladding: current state and future, *Welding International*, 25(3), 234-243.
- Buytoz, S., Orhan, A., Gur, A. K., Caligulu, U., (2013). Microstructural Development of Fe–Cr–C and B 4 C Powder Alloy Coating on Stainless Steel by Plasma-Transferred Arc Weld Surfacing, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(8), 2197-2204.
- Cay, V.V., Ozan, S., Gök, M.S., (2011). The effect of hydrogen shielding gas on microstructure and abrasive wear behavior in the surface modification process using the tungsten inert gas method, *Journal of Coatings Technology and Research*, 8(1), 97-105.
- Chen, J.M., Chun, G., Zhou J.S., (2012). Microstructure and Tribological Properties of Laser Cladding Fe-Based Coating on Pure Ti Substrate, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(9), 2171–2178.
- Chandrasekar, M., Shivalingappa, D., Channankaiyah, D., (2016). Recent Developments in Cladding Process – A Review, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2(10), 310-315.
- Dai, S., Zuo, D.W., Fang, C., Zhu, L., Cheng, H., Gao, Y.X., Li, W.W., (2016). Characteration of Laser Cladded Fe-Mn-Cr Alloy Coatings Modified by Plasma Nitriding, *Materials Transactions*, 57(4), 539-543.
- Du, B., (2013). Fabrication of In-situ Fe-Ti-B composite coating by laser cladding, *Surface Review and Letters*, 20(3-4), 1-8.
- Fu, Z.K., Ding, H.H., Wang, W.J., Liu, Q.Y., Guo, J., Zhu, M.H., (2015). Investigation on microstructure and wear characteristic of laser cladding Fe-based alloy on wheel/rail materials, *Wear*, 330, 592-599.
- Gasik, M., eds. (2013). *Handbook of ferroalloys: theory and technology*, Chapter 12: Technology of Molybdenum Ferroalloys, 387-396, Butterworth-Heinemann.
- Luo, K.Y., Xu, X., Zhao, Z., Zhao, S.S., Cheng, Z.G., Lu, J.Z., (2019). Microstructural evolution and characteristics of bonding zone in multilayer laser cladding of Fe-based coating, *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 50-58.
- Luyckx, S., Love, A., (2004). The relationship between the abrasion resistance and the hardness of WC-Co alloys, *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(10), 579-582.
- Maropoulos, S., Karagiannis, S., Ridley, N., (2007). Factors affecting prior austenite grain size in low alloy steel, *Journal of materials science*, 42(4), 1309-1320.
- Toms, T., (2013). *The Application of Laser Cladding to Mechanical Component Repair, Renovation and Regeneration in Katalinic, B., Tekic, Z., eds, DAAAM International Scientific Book, DAAAM International, 587-608, Vienna, Austria.*
- Wang, X.H., Han, F., Liu, X.M., Qu, S.Y., Zou, Z.D., (2008). Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings, *Materials Science and Engineering: A*, 489(1-2), 193-200.
- Zanzarin, S., Bengtsson, S., Molinari, A., (2016). Study of dilution in laser cladding of a carbon steel substrate with Co alloy powders, *Powder Metallurgy*, 59(1), 85-94.
- Zhang, M., Liu, S.S., Luo, S.X., Qu, K.L., (2018). Effect of molybdenum on the high-temperature properties of TiC-TiB<sub>2</sub> reinforced Fe-based composite laser cladding coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 742, 383-390.

## **Wear characteristics and microstructure of ferromolybdenum and ferroboron reinforced laser claddings**

### **Extended abstract**

*Mold parts are exposed to severe abrasive-corrosive conditions during the service. Abrasion causes a great economic loss for molding processes. Tribological properties of mold surfaces can be improved by several techniques. An abrasion-resistant coating on the mold surfaces or the repair of worn mold parts can be carried out by laser cladding method.*

*In this study, iron-based coatings alloyed by ferromolybdenum (FeMo) and ferroboron (FeB) were produced by laser cladding method in order to improve the abrasion resistance of AISI 4140 steel. The wear resistance of the coatings was determined by the ball-on-disc wear test. Microstructure studies were performed under both an optical microscope and scanning electron microscope. The macro hardness of the coatings was measured from the top surface. In addition, microhardness measurements were carried out along the cross section of the coatings. Vickers indenter was used both in macro and microhardness tests.*

*Microstructural investigations reveal that FeB reinforced coating exhibits a homogeneous microstructure that consists of dendrites and eutectic. In contrast, FeMo reinforced coating has a layer of Widmännstätten ferrite. Below this layer, the formation of fine precipitations was observed. Minimum macro hardness value was obtained in the unreinforced coating. The surface hardness of FeB reinforced coating is higher than that of FeMo reinforced coating. However, the microhardness of the middle zone reached the hardness value of 945 HV while the top surface is 318 HV in FeMo reinforced coating. The hardness of the middle zone of FeMo reinforced coating is higher than the top surface hardness of FeB reinforced coating. Relatively low hardness of the top surface of the FeMo reinforced coating relies on the Widmännstätten ferrite layer. It can be concluded that the FeMo reinforced coating exhibited a non-homogeneous hardness distribution along the cross-section. In contrast, FeB reinforced coating showed a homogeneous hardness distribution all along the*

*coating. The hardness of reinforced coatings tended to decrease right above the steel substrate due to the dilution of coating material by the substrate material.*

*The increased coating hardness increased the wear resistance, resulting in less material loss in the FeB containing coating. The unreinforced coating showed the maximum material loss. It is understood that the surface hardness has a great influence on the wear resistance. Shallow and discontinuous scratches appeared in the worn surface of the FeB reinforced coating. Unreinforced and FeMo reinforced coatings were abraded severely. As a result, deep grooves and continuous scratches were generated. The hardness of the worn surfaces was increased due to the plastic deformation.*

**Keywords:** *Laser cladding, wear, hardness, boron, molybdenum*



# Tarihi eserlerde doğal yapıtaşı olarak kullanılan Lefke taşının (Osmaneli/Bilecik) jeolojik ve mühendislik özellikleri

**H. Haluk SELİM**

*İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mücevherat Müh. Bl. Küçükyalı Yerleşkesi İSTANBUL  
hselim@ticaret.edu.tr ORCID: 0000-0001-8704-4935, Tel: (507) 452 3852*

**Ahmet KARAKAŞ\***

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh. Bl. Umuttepe Yerleşkesi İZMİT – KOCAELİ  
akarakas@kocaeli.edu.tr ORCID: 0000-0002-4672-2063, Tel: (262) 303 3145*

**Özkan CORUK**

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh. Bl. Umuttepe Yerleşkesi İZMİT – KOCAELİ  
ocoruk@kocaeli.edu.tr ORCID: 0000-0001-5072-200X, Tel: (262) 303 3143*

*Geliş: 01.02.2019, Revizyon: 08.04.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019*

## Öz

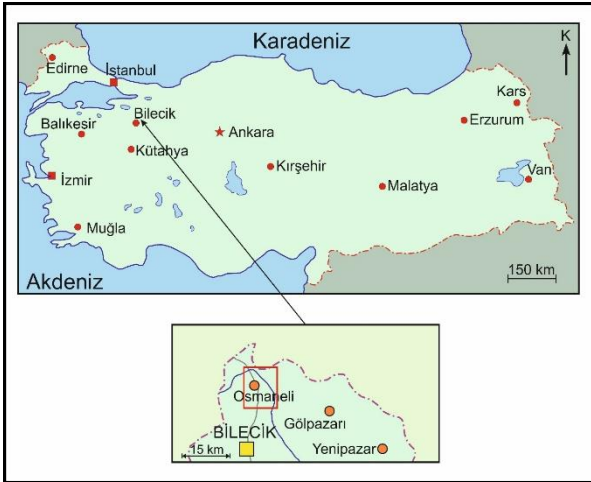
*Lefke taşı bir kumtaşı çeşidi olup yapı taşı olarak İstanbul Haydarpaşa tren garı, Eskişehir Hükümet Konağı, Bebek ve Bostancı camileri ile Osmaneli ilçe merkezi ve civarında bulunan cami, medrese, kilise ve evlerde yaygın olarak kullanılmıştır. Fakat yapıtaşı olarak kullanılması açısından bilimsel olarak literatüre geçmiş bir çalışma mevcut değildir. Bu eksikliği gidermek ve Lefke taşının yapıtaşı özelliklerini belirlemek amacıyla jeolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerin araştırıldığı bir çalışma yapılmıştır. Lefke taşının yapıtaşı olarak değerlendirilmesi amacıyla arazi ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Arazi çalışmaları ile Lefke taşının jeolojik özellikleri ve laboratuvar çalışmaları ile fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Arazi çalışmaları mostra başı çalışmalar ile numune alma işlemlerini kapsarken, laboratuvar çalışmaları ise Lefke taşının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla standartlara (TSE, ASTM) uygun olarak ilgili deneylerin yapılmasını kapsamıştır. Arazi gözlemleri ve laboratuvar deneylerinden elde edilen fiziksel ve mekanik özelliklere ait değerler yardımıyla Lefke kumtaşının yapıtaşı olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Lefke taşı, yapıtaşı, kumtaşı, Osmaneli, mekanik özellikler

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Doğal yapı taşları yaygın olarak kaplama amaçlı yapıların dış yüzeyleri, yer döşemeleri, bordür ve kenar süsü veya bloktaş şeklinde kullanılırlar. Kireçtaşı, traverten, kumtaşı, granit, diyabaz, bazalt, mermer ve arduvaz yapı taşı olarak kullanılan yaygın litolojilerdir. Bu çalışma Lefke taşının yapıtaşı özelliklerini belirleme amaçlı araştırmaları içermektedir. Söz konusu Lefke taşı güney Marmara bölgesinde Bilecik ili Osmaneli ilçesinin güneyinde ve güneydoğusunda yer alır (Şekil 1). Geçmiş yıllarda Anadolu'nun birçok tarihi şehirlerinde, Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde kumtaşı, kireçtaşı, mermer ve tüfler büyük bir ustalıkla işlenerek cami, medrese, kilise ve han gibi yapıların iç ve dış mekânları kaplanmış ve süslenmiştir (Erdem, 1981; Çelik, 2003; Kumsar vd., 2003; Kaya vd., 2008). Cumhuriyet döneminde de Ankara ve İstanbul gibi büyük şehirlerde büyük binaların doğal taşlar ile yapılmasıyla taş işçiliğinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası

Osmaneli ilçe merkezinde Osmanlı dönemine ait sivil mimarlık örnekleri halen mevcuttur. Daha sonra yapılmış yapılar ahşap yapı tekniği ile yapılmıştır. Her biri zarif görünümlü motifli süslemelerle bezenmiştir. İlin sahip olduğu tarihi-kültürel değerlerin birçoğu Türk Sanat tarihinin ilk dönem Osmanlı mimarlık eserlerinin bulunduğu çağa aittir. Camiler

genellikle taş temelden, kare plan üzerine kubbeli, bir kısmı tamamen taştan sade sade bir mimari ile yapılmıştır (Şekil 2). Yine kubbeli özellikte yapılmış hamamlar ise soğuktan sığağa doğru ilerleyen bölümler halindedir. Türbelerin inşasında kesme taşlar kullanıldığı gibi tuğla da kullanılmış ve üzeri kubbe ile örtülmüştür. Kesme taş ve tuğlanın da kullanılarak yapıldığı kervansaraylar ise dikdörtgen plana sahip ve kapı üzerleri kemerlidir. Ayrıca; köprüler taştan yapılmış, çeşmeler neo-klasik yapıda, surlar Roma ve Bizans dönemine ait özellikte, kilise antik ve Bizans sanatları karışımı bir mimari üslupta yapılmıştır.



Şekil 2. Osmaneli'nde Lefke taşı kullanılarak 1542 yılında yapılmış olan Osmanlı dönemine ait Rüstempaşa Camii

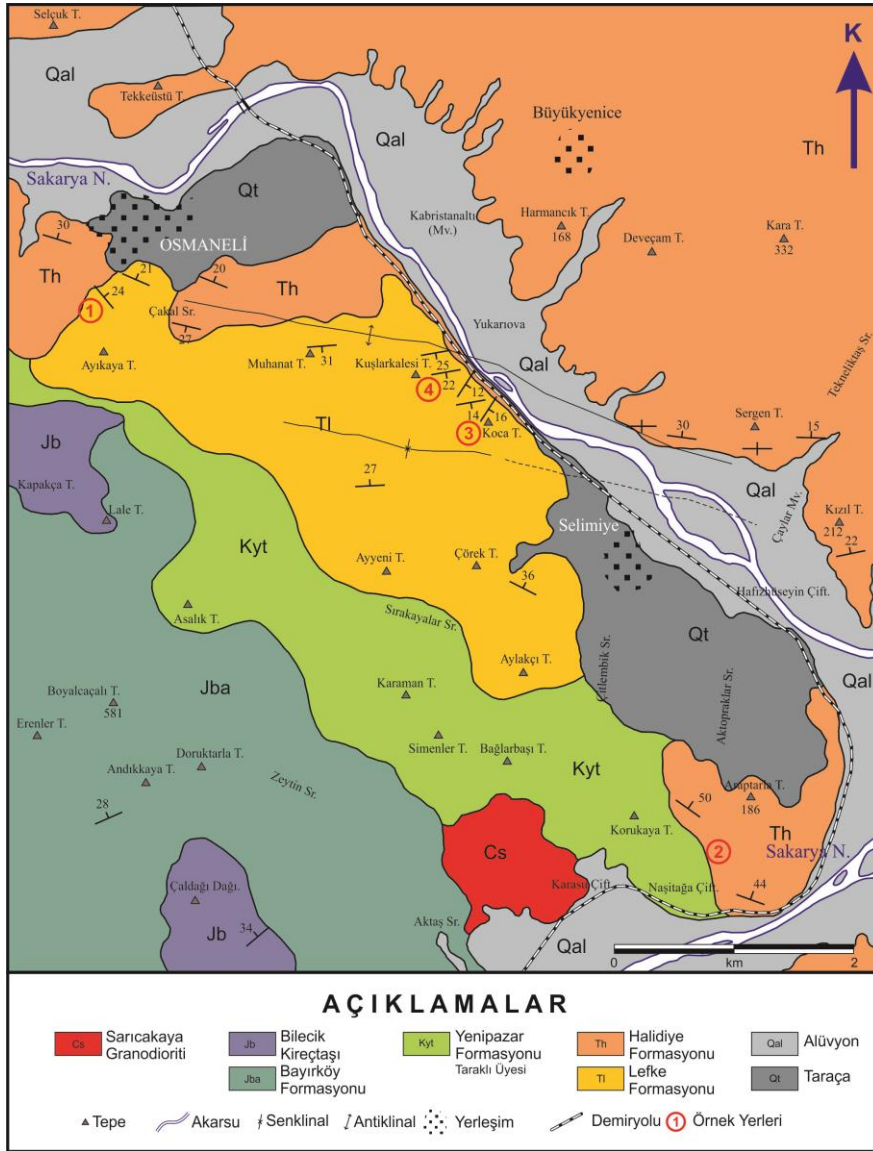
Bu çalışmanın konusu olan Lefke taşı bir kumtaşı çeşidi olup yapı taşı olarak İstanbul Haydarpaşa tren garı, Eskişehir Hükümet Konağı, Bebek ve Bostancı camileri (Erdem, 1981) ile Osmaneli ilçe merkezi ve civarında bulunan cami, medrese, kilise ve evlerde yaygın olarak kullanılmıştır. Fakat yapıtaşı olarak kullanılması açısından bilimsel olarak

literatüre geçmiş bir çalışma mevcut değildir. Bu eksikliği gidermek ve Lefke taşının özelliklerini belirlemek amacıyla Lefke taşının yapıtaşı özellikleri araştırılmıştır.

### Bölgesel jeoloji

İnceleme alanını kapsayan bölgede farklı köken ve yaşlara sahip formasyon ve birimler izlenir. Bölgenin en yaşlı kayalarını Sakarya Zonu temel birimlerini oluşturan Sarıcakaya Granitoidi oluşturur (Göncüoğlu vd., 1996). Bu temel birim üzerine Liyas yaşlı, transgresif istife sahip Bayırköy Formasyonu uyumsuz olarak gelmektedir. Bayırköy Formasyonu üzerine Orta Jura-Alt Kratese yaşlı, karbonat platformu şeklinde çökelmiş Bilecik kireçtaşı

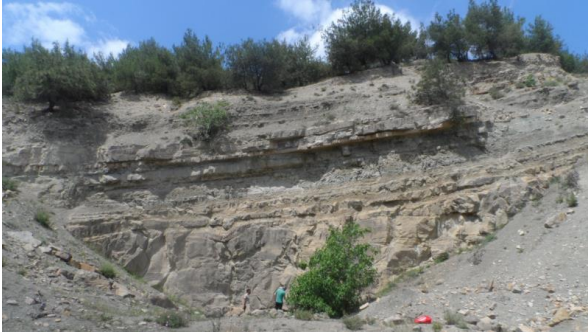
gelmektedir (Granit ve Tintant, 1960). Bu formasyonların üzerine kumtaşı ağırlıklı Üst Kratese-Paleosen yaşlı, yamaç-havza tipinde ve üste doğru sığ ortamda çökelen Yenipazar formasyonuna ait Taraklı üyesi yer almaktadır (Saner, 1980). Taraklı üyesi üzerine göl ortamında çökelmiş kumtaşları olan Paleosen yaşlı “Lefke Formasyonu” uyumsuz olarak gelmektedir. Üste doğru Alt-Orta Eosen yaşlı ve türbiditik özellikte olan Halidiye Formasyonu çok düşük açılı uyumsuzluk olarak çökelmiştir (Saner, 1977). Bölgenin en genç birimleri ise taraça ve alüvyondur. İnceleme alanının jeolojik haritası Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 3. İnceleme alanının jeolojik haritası

### Lefke Taşının Jeolojik Özellikleri

Lefke taşı, bölgedeki bej, sarımsı veya yeşilimsi orta ve ince tabakalı şeyl, marn, kiltası ve çamurtaşları ile ardalanmalı Paleosen görsel çökellerinin orta tabakalıdan masife değişen kalınlıklardaki kumtaşı düzeyleridir. İstif Kuşlarkalesi mevkiinde en tipik kesitini vermektedir (Şekil 4). Formasyon alttan itibaren masif olarak başlar, üste doğru yeşil renkli ince tabakalı şeyl, marn, kiltası, ince-orta tabakalı killi kireçtaşı, kumtaşı ağırlıklı ve yeşilimsi beyaz-gri renklerde bitümlü şeyllerden oluşur. İstif daha sonra kalın-orta-ince tabakalı ve genellikle açık gri ve açık sarı renklerde kumtaşı ile devam etmektedir. Birim içerisinde nadir olarak ince seviyeler halinde kömür ve yer yer jips de bulunmaktadır. Lefke Formasyonu yaklaşık 20-300 m kalınlığa sahiptir. Altta Taraklı üyesi ile uyumsuz, üstteki Halidiye Formasyonu ile de uyumludur ancak bazı noktalarda açısız farklılıklar gözlenmektedir. Göl ortamında çökelmiş formasyonun yaşı Duru vd. (2002) çalışmasına göre Paleosen olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4. Kuşlarkalesi mevkiinde Lefke Formasyonunun tipik kesiti

### Materyal ve metot

#### Materyal

Bu çalışma kapsamında Lefke taşının mühendislik özelliklerin belirlenmesi amacıyla laboratuvarında deneylerde kullanılmak üzere standartlara uygun numuneler hazırlanmıştır. Arazi çalışmaları esnasında arazide farklı lokasyonlarda Lefke

Formasyonu kumtaşı mostralardan sökülen blok boyutlu kaya malzemeleri Osmaneli ilçe merkezinde yer alan yerel bir mermer atölyesinde deneyler için gerekli geometrik boyut ve şekillerde kestirilerek laboratuvar deneylerinde kullanılacak hale getirilmiştir. Numuneler küp (50×50×50 mm), dikdörtgenler prizması (50×50×300 mm) ve levha (100×70×20 mm) şeklinde kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Afyon Kocatepe Üniversitesi Akredite Doğaltaş Analiz Laboratuvarına (AKÜ-DAL) fiziksel ve mekanik deneylerin yapılması için teslim edilmiştir. TURKAK tarafından akredite edilmiş AKÜ-DAL laboratuvarında deneyler standartlara (TSE, ASTM) uygun olarak yapılmıştır.

#### Metot

Lefke taşının fiziksel ve mekanik özellikleri ve yapı taşı olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan işlemler arazi ve laboratuvar kısımlarından oluşmaktadır. İlk etapta yürütülen arazi çalışmaları jeolojik ve stratigrafik çalışmalar yanında numune alma işlerini kapsamıştır. Alınan örneklerden, fiziksel ve mekanik deneyler için kullanılacak gerekli numuneler mermer atölyesinde hazırlanmıştır. Lefke taşının fiziksel ve mekanik özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla laboratuvar çalışmaları yürütülmüştür. Afyon Kocatepe Üniversitesi Akredite Doğal Taş Laboratuvarında (AKÜ-DAL); Lefke taşının fiziksel (görünür ve özgül ağırlık, toplam ve açık gözeneklilik, ağırlıkça su emme) ve mekanik özellikleri (tek eksenli sıkışma dayanımı, eğilme dayanımı tayini, Knoop sertlik tayini, aşınma direnci tayini) test edilmiş ve bu çalışmada yorumlanmıştır. Lefke taşının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziko-mekanik deneyler TS EN 1936 (2010), ASTM D5550-06 (2006), TS EN 13755 (2009), TS EN 12371 (2003), TS EN 1926 (2000), TS EN 13161 (2009), TS EN 14205 (2004), TS EN 14157 (2017), ASTM D5731-16 (2016) ve ASTM D5873-14 (2014) standartlarına göre yapılmıştır. Arazi ve

laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar mühendislik jeolojisi kapsamında kayalar için geliştirilmiş sınıflamalar ile değerlendirilerek kayaç sınıfları belirlenmiştir.

## Bulgular

Lefke taşının yapı taşı olarak değerlendirilmesi amacıyla arazi ve laboratuvar çalışmalarından elde edilen bulgular değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları ile Lefke taşının jeolojik özellikleri ile ilgili bulgular elde edilirken laboratuvar çalışmaları ile fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili bulgular elde edilmiştir. Arazi çalışmaları, mostra başı çalışmalar ve numune alma işlemlerinden oluşurken, laboratuvar çalışmaları Lefke taşının fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla standartlara (TSE, ASTM) uygun olarak ilgili deneylerin yapılmasını kapsamaktadır. Kumtaşının yapıtaşı olarak kullanılabilirliği arazi gözlemleri, tarihi yapılardaki yapıtaşı performansı, fiziksel ve mekanik özelliklerine ait laboratuvar deney sonuçları ile değerlendirilmiştir. Deneylerde kullanılan örnek sayıları ve deney yöntemleri standartlara dayalı olup sonuçlar birimi temsil edicidir.

## Fiziksel (İndeks) Özellikler

Kayacın fiziksel özellikleri ölçülebilen, gözlenebilen ve dış görünüşü ile ilgili özelliklere denir. Bu çalışmada kumtaşlarının fiziksel özelliklerden görünür yoğunluk, toplam ve açık gözeneklilik, özgül ağırlık, atmosfer basıncında su emme gibi parametreler tayin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kumtaşların fiziksel durumlarını ortaya koymaktadır. TS EN 1936 (2010) standardına göre yapılmış deney sonuçlarına göre görünür yoğunluk (B) ortalama 2,38 g/cm<sup>3</sup>'tür. Açık gözeneklilik ortalaması %7,07 olarak hesaplanmıştır. Toplam gözeneklilik ortalaması ise %11,26 olarak hesaplanmıştır. ASTM D-5550-06 (2006) standardına göre yapılan deneyde elde edilen sonuçlara göre özgül ağırlık ortalama 2,68 g/cm<sup>3</sup>'tür. Fiziksel özellik kategorisinde

belirlenen diğer bir özellik TS EN 13755 (2009) standardına göre yapılan atmosfer basıncında su emme tayinidir. Su emme deneyinde kayaç numuneleri 24 saat su içinde bekletilerek suyun kayacın boşluklarına ne kadar nüfuz ettiği belirlenir. Atmosfer basıncında su emme tayini deney sonuçları ortalaması %2,93 olarak hesaplanmıştır. Hacimce su emme (Sh) Eşitlik 1 (Onaran, 2014) kullanılarak %6,97 hesaplanmıştır.

$$Sh = S \cdot a \cdot B \quad (1)$$

Sa: Ağırlıkça su emme (%)

B: Görünür yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

TS EN 12371 (2003) standardına göre yapılmış deney sonuçlarından kütle kaybı ortalama %0,12 olarak ortaya çıkmıştır. Tablo 1 Lefke taşının fiziksel özelliklerinin ortalama değerlerini göstermektedir. Anon (1979) sınıflamasına göre görünür yoğunluk açısından orta yoğunluk sınıfına girmektedir. Yine toplam gözeneklilik açısından da Anon (1979) sınıflamasına göre orta gözenekli sınıfa girmektedir.

Yukarıda belirlenen fiziksel özelliklerden hacimce su emme (Sh) ve porozite (p) değerleri yardımıyla kayaların dona dayanıklılık özellikleri görgül bir yöntemle belirlenebilir. Suyu doyma oranı (S) olarak belirtilen bu özellik Eşitlik 2 yardımıyla yaklaşık olarak %61,9 olarak hesaplanır.

$$S = Sh/p \quad (2)$$

Sh: hacimce su emme (%)

p: kayacın porozitesi (%)

Bu değerlerin <%80 olması durumunda taş dona dayanıklı kabul edilmektedir (Onaran, 2014). Kayacın doluluk oranı (komposite, k) toplam hacmi 1 kabul edilen kayacın, toplam porozitesinin (p) toplam hacimden çıkarılması ile elde edilir. Eşitlik 3 ile komposite yaklaşık %88,74 olarak hesaplanır.

$$k = 1 - p \quad (3)$$

### Mekanik Özellikler

Lefke taşının mekanik özellikleri laboratuvar ortamında belirlenmiştir. Kumtaşlarının tek eksenli sıkışma dayanımı, sabit moment altında eğilme dayanımı, aşınma direnci ve Knoop sertlik değerleri ilgili standartlara göre laboratuvarında tayin edilmiştir. Tablo 2 Lefke taşının mekanik özelliklerinin ortalama değerlerini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar kumtaşların mekanik durumlarını ortaya koymaktadır. Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri 50×50×50 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Taşların tek eksenli sıkışma dayanımına göre sınıflandırması genelde silindir numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre değerlendirilmektedir. Küp numuneler üzerinde yapılan deney sonuçlarının, silindir numuneler ait deney sonuçlarına dönüşümünde ise genelde beton numuneler üzerindeki deney sonuçlarına göre regresyon analizleri yapılmıştır. Bu konuda Day (1996), Monday ve Dhir (1984) Sangha ve Dhir (1972) ve BS1881standartında farklı görgül regresyon veya dönüşüm bağıntıları

verilmiştir. Bu bağıntılarla ilgili olarak Arıoğlu vd (1996) tarafından hazırlanan kaynakta yüksek dayanımlı betonlarda 90 günlük kür sonrası küp-silindir numuneler arasındaki tek eksenli sıkışma dayanım ilişkisindeki regresyon katsayısı 0.88 ile 0.99 aralığında önerilmiştir. Lefke taşından hazırlanan küp numunelerin tek eksenli basınç dayanımı ortalama 94 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer silindir numune olarak karşılığı yukarıdaki bağıntıya göre 85 MPa dolayındadır. Bu değer Deer ve Miller (1966) sınıflamasında orta dayanımlı kaya sınıfını ifade etmektedir. Kumtaşının eğilme dayanımı ortalama 11,45 MPa olup TS 11145 (1993) konglomera için belirlenen eğilme dayanımı sınır değerinden (7 MPa) yaklaşık %63,6 daha yüksektir. Knoop sertlik (HK) katsayısı 353 olup Mohs sertlik skalasındaki karşılığı orta sertliği gösteren 4,5-5'tir. Geniş disk aşındırma (WWA, Capon yöntemi) deneyleri sonucunda ortalama aşınma değeri 18,43 mm elde edildiğinden Çobanoğlu ve Çelik (2017) sınıflamasına göre orta aşınabilir kaya grubuna girmektedir.

**Tablo 1.** Lefke taşının fiziksel özellikleri

Deneyler	İlgili Standart	Numune Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	Anon (1979) Sınıflamasına Göre
Görünür Yoğunluk (B), (g/cm <sup>3</sup> )	TS EN 1936	6	2,38	0,051	
Özgül Ağırlık, (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D 5500-06	5	2,68	0,009	Orta (2,2 - 2,55)
Ağırlıkça Su Emme (Sa), (%)	TS EN 13755	6	2,93	0,56	
Hacimce Su Emme (Sh), (%)	Sh=SaxB	-	6,97	-	
Açık Gözeneklilik	TS EN 1936	6	7,07	2,42	
Toplam Gözeneklilik	TS EN 1936	6	11,26	1,91	Orta (%5- %15)
Don Sonrası Kütle Kaybı	TS EN 12371	10	0,12	-	



**Tablo 2.** Lefke taşının mekanik özellikleri

Deneyler	İlgili Standart	Numune Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	Tanımı	Sınıflama Adı
Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (MPa)	TS EN 1926	10	94 (Küp) 85 (Karot)	21	Orta Dayanımlı Kaya (56-112 MPa)	Deer ve Miller (1966)
Eğilme Dayanımı (MPa)	TS EN 13161	10	11,45	5,85	$\geq 7$ MPa	TS 11145 (1993) Konglomera Yapı Taşı Özellikleri
Knoop Sertlik (HK), [Mohs]	TS EN 14205	40 Ölçüm	353 (4,5-5)	40,76	Orta Sertlikte	Mohs Sertlik Skalasına Göre
Aşınma Dayanımı (Mm), WWA	TS EN 14157	6	18,43	3,85	Orta Aşınabilir Kaya	Çobanoğlu ve Çelik (2017)

### Yapıtaşı Olarak Kullanılabilirliği

Kumtaşları geçmişten günümüze yaygın olarak kullanılmakta olan yapıtaşı malzemelerdir. Yapıtaşı olarak kullanılabilirlik özellikleri için standartlarda belirlenen sınır değerler olması yanında binalar ve yapılarda uzun süreli kullanımları da önem arz eder. Ülkemizde kumtaşlarının yapıtaşı olarak özellikleri ve kullanımlarını değerlendiren çeşitli araştırmalar mevcuttur (Kılıç, 2017; Kılıç ve Gültekin, 2017; Kılıç ve Gültekin, 2011; Özkan ve Yaşar, 2007). Ülkemiz yanında özellikle Amerika, Kanada, İngiltere ve Avustralya gibi ülkelerde yaygın bir şekilde kumtaşlarının yapıtaşı olarak kullanılması üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Hockman ve Kessler, 1957; Crocq, 2010; McCabe vd., 2011; Cooper ve Kramer, 2014). Lefke taşının yapıtaşı olarak kullanılabilirliği için gözlemsel ve ASTM C616 (2015) ile Quick (2002) tarafından önerilmiş sayısal değerlendirmelerden yararlanılmıştır. Gözlemsel olarak Lefke taşının arazide ki durumu yanında bina ve yapılarda kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Arazide mostralardaki sağlam, ayrışmadan fazla etkilenmemiş hali bina ve yapılarda da kendini göstermektedir. Sayısal

değerlendirme şemalarından ilki ASTM C616 (2015) kuvars içerikli yapı taşları için standart özellikler standardıdır. Bu standartta silis içeriğine göre kayaçlar kumtaşı ( $\text{SiO}_2 \leq \%60$ ), kuvarsitik kumtaşı ( $\text{SiO}_2 \leq \%90$ ) ve kuvarsit ( $\text{SiO}_2 > \%95$ ) olarak sınıflandırılmaktadır. Her bir sınıfa ait fiziksel ve mekanik özelliklerin minimum veya maksimum değerleri Tablo 3'te verilmektedir. Lefke kumtaşı kimyasal analizlerine göre  $\text{SiO}_2$  içeriği ortalama %48 civarı olup ASTM C616 (2015) standardına göre I. grup sınıflamaya (kumtaşı) girmektedir. Bu sınıflama için belirlenmiş olan minimum ve maksimum değerleri, Lefke kumtaşı gereğinden fazla bir şekilde sağladığı görülmektedir (Tablo 3).

İkinci sayısal değerlendirme şeması Quick (2002) çalışmasında yapıtaşı olarak kullanılan kumtaşlarının en belirgin özelliklerinin değişim aralıklarıdır. Lefke kumtaşının fiziksel ve mekanik özelliklerinin sayısal değerlerinin Quick (2002)'de verdiği sayısal değişim aralıklarına göre değerlendirmenin sonucu Şekil 5'te verilmektedir. Bu değerlendirme şemasına göre Lefke kumtaşının fiziksel ve mekanik özelliklerinin sayısal değerleri yapıtaşı olarak kullanılan

kumtaşları için verilen değişim aralıkları içinde kaldığı görülmektedir (Şekil 5).

Lefke taşının ülkemizde yapı taşı olarak değerlendirilebileceği alanların başında inşaat sektörü ve restorasyon işleri gelmektedir. İnşaat sektörü ülkemizde çok dinamik ve gelişen bir yapıya sahip olduğundan doğal yapı taşlarının inşaat sektöründe kullanımları sürekliliğini korumaktadır. İnşaat sektöründe kamu ve özel binalarda kaplama taşı, yer taşı, bordür taşı veya doğal yapı taşı kullanımı söz konusu iken tarihi yapı ve binalarda ise yüzeyde uygulanmış doğal yapıtaşlarının aşınan, eskiyen ve yıpranan kısımlılarının değişimi söz konusu olmaktadır. 2017 yılında başlayıp halen devam eden Haydarpaşa tren garı restorasyonu için kullanılan Lefke taşı buna güzel bir örnektir.

### Ekonomik potansiyel

Doğal yapı taşları ekonomik olarak önemli jeolojik malzemedir. Bu malzemelerin fiziksel, mekanik, kimyasal ve teknolojik özelliklerinin uygun olması yanında görsel

olarak da uygun olması gerekmektedir. Ayrıca sağlık açısından da herhangi bir olumsuz unsur içermemelidir. Çimentosu ve taneleri silisli olan kumtaşları görünüş ve renk özelliklerinin de uygun olmasıyla en uygun doğal yapı taşı potansiyeline sahiptirler. Bu özellikleri bünyesinde barındıran ve çalışma konusu olan “Lefke Taşı” bu anlamda uygun bir doğal yapı taşı olmaktadır. Bu taşın yaklaşık 100 sene önce Haydarpaşa Tren Garı binasında kaplama taşı olarak kullanılması bu taşın yapıtaşı olarak kullanılmasında referans bir uygulama olmuştur. Bu binada dış cephe olarak sergilediği performans taşın farklı yapılarda da doğal taş olarak kullanılmasını cazibeli hale getirmektedir. Bu nedenle Lefke taşının bir ekonomik değeri ortaya çıkmaktadır. Söz konusu ekonomik değer bölgede yer alan jeolojik malzemenin toplam rezervi ile alakalıdır.

**Tablo 3.** Lefke taşı özelliklerinin ASTM C616 (2015) standardına göre değerlendirilmesi.

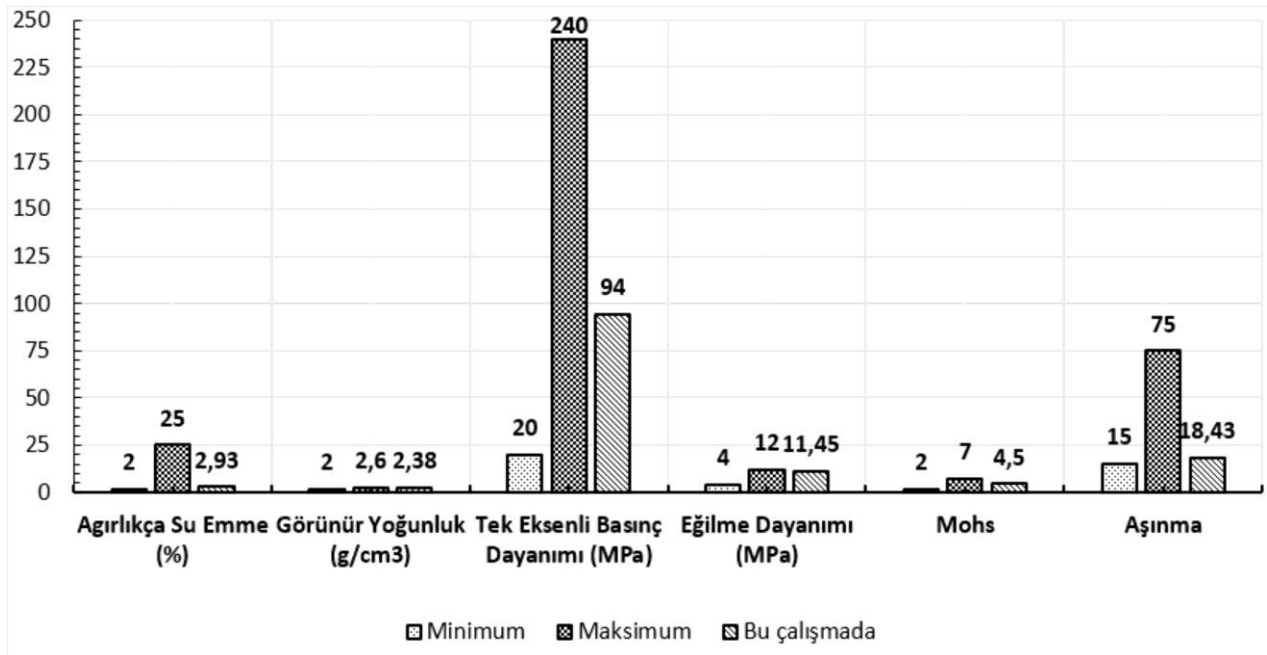
Parametre	Test Şartı	Sınıflama	Lefke Kumtaşı
Ağırlıkça su emme, maks., (%)	8	I Kumtaşı SiO <sub>2</sub> ≤60	2,93
	3	II Kuvarsitik Kumtaşı SiO <sub>2</sub> ≤%90	-
	1	III Kuvarsit SiO <sub>2</sub> > %95	-
Görünür yoğunluk, min., (kg/m <sup>3</sup> )	2000	I Kumtaşı	2380
Tek eksenli sıkışma dayanımı, min., (MPa)	28	I Kumtaşı	94

Eğilme dayanımı, min., (MPa)	2,4	I	Kumtaşı	11,45
Aşınma dayanımı, min., (Ha)	2	I	Kumtaşı	18,43

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Maden İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2018 yılında yayınladığı istatistik verilere göre, 2016 ve 2017 yıllarında İstanbul Maden İhracatçıları Birliği (İMİB) maden ihracat değerleri verisinde yurtdışına satışı yapılan madenler içinde en yüksek rakama sahip doğal yapı taşlarının olduğu görülmektedir (Tablo 4). 2017 ihracat tutarı yaklaşık 2 milyar dolar ile maden ihracatının yaklaşık %47'sini doğal taşlar oluşturmaktadır. Doğal yapı taşlarının yurtdışı satışı yanında yurtiçi üretim ve satışları da ülke ekonomisinde önemli yer tutmaktadır. Yurtdışı ve yurtiçi

üretimi yapılan doğal yapı taşların en büyük kullanım alanı inşaat sektörüdür. Günümüzde doğal yapı taşları zemin döşemelerinde (%40), iç ve dış kaplamada (%27), anıt yapılar ve mezarlıklarda (%13), süs eşyası yapımında (%8) ve diğer alanlarda (%12) kullanılmaktadır (Ekincioglu vd., 2014).

Buna göre doğal yapı taşlarının inşaat sektöründe kullanım alanlarının önemli bir payının olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada ortaya konulan Lefke taşının jeolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri inşaat sektörüne doğal yapıtaşı kullanımında yol gösterici bir çalışma olacaktır.



Şekil 5. Yapıtaşı olarak kullanılan kumtaşlarının en belirgin özelliklerinin değişim aralıkları Quick (2002) ve Lefke taşının değerleri

**Tablo 4.** Yıllara göre maden grubu ihracat tutarları (<http://www.migem.gov.tr/Istatistik.aspx>)

Mal Grubu	2016 İhracat Tutarı (\$)	2017 İhracat Tutarı (\$)
Endüstriyel Mineraller	758800227	874877173
Metalik Cevherler	932236730	1400026746
Doğal Taşlar	1805525185	2048092463
Mineral Yakıtlar	6839076	12085872
Toplam	3503401220	4335082256

### Muhtemel Rezerv

Taş ocağı alanının seçimi yapılırken, en önemli nokta, istenilen kalitede taş miktarının bulunmasıdır. Rezerv tahmini yeni potansiyel ocakların belirlenmesinde yardımcı olabilir. Toplam rezerv aşağıdaki formüle göre hesaplanabilir:

$$\text{Toplam Rezerv (ton)} = \text{Alan (m}^2\text{)} \times \text{Kalınlık (m)} \times \text{Görünür Yoğunluk (ton/m}^3\text{)}$$

Lefke Formasyonu içinde yer alan Lefke taşının tahmini rezervi alan, kalınlık ve

yoğunluk değerlerinin çarpılması yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu çalışmada saha çalışmalarıyla jeoloji haritası hazırlanarak birimin yayılımı (alanı) ve birim kalınlığı ölçülü stratigrafik kesitlerle belirlenmiştir. Laboratuvarda TS EN 1936 (2010) standardına göre elde edilen ortalama görünür yoğunluk değeri rezerv hesabında kullanılmıştır. Bu verilere göre Lefke taşının muhtemel rezerv değeri  $2677,5 \times 10^6$  ton olarak bulunmuştur (Tablo 5).

**Tablo 5.** Lefke taşının arazi ve laboratuvar verilerine göre hesaplanan muhtemel rezervi

Kayaç Adı	Alanı (m <sup>2</sup> )	Ölçülebilen Kalınlık (m)	Görünür Yoğunluk (ton/m <sup>3</sup> )	Toplam Rezerv (ton)
Lefke Taşı	$75 \times 10^6$	15	2,38	$2677,5 \times 10^6$

### Sonuçlar ve öneriler

Lefke taşının fiziksel ve mekanik özellikleri yapıtaşı olarak kullanılmasının belirlenmesi amacıyla ortaya konmuştur. Gözlemsel ve iki şematik sayısal değerlendirme yöntemleriyle Lefke taşının yapıtaşı özellikleri değerlendirilmiştir. Gözlemsel olarak arazideki sağlam görünümü ve duruşu, eski yapılarıdaki kullanımı ve estetik görünümü öne çıkmıştır. Şematik sayısal değerlendirmenin ilki, ASTM C616 (2015) standardındaki kumtaşı için fiziksel ve mekanik özelliklerin sınır değerleri fazlasıyla

sağlaması olmuştur. İkinci sayısal şematik değerlendirme Quick (2002)'e göre Lefke kumtaşının fiziksel ve mekanik değerlerinin yaygın yapıtaşı olarak kullanılan kumtaşlarının minimum ve maksimum değerleri arasına düşmesi ile sağlamıştır. Ayrıca, Lefke taşının Şekil 5. Yapıtaşı olarak kullanılan kumtaşlarının en belirgin özelliklerinin değişim aralıkları Quick (2002) ve Lefke taşının değerleri hesaplanmış suya doyma oranı ( $S = \%62,5$ )  $\%80$ 'den düşük olduğundan dona dayanıklı olduğu kabul edilmektedir. Gözlemsel değerlendirmelerin olumlu olması, iki şematik sayısal değerlendirmenin sağlanmış olması ve görgül

olarak dona dayanıklı olduğunun kabul edilmesi gibi değerlendirmeler ile Lefke kumtaşının yapıtaşı olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmaktadır.

Literatür araştırmaları sonucu Lefke taşı ile ilgili ayrıntılı jeolojik, mineralojik, mühendislik çalışmalarının kısıtlı veya hiç olmadığı görülmüştür. Bu anlamda bu çalışma Lefke taşının, jeolojik, mineralojik, fiziksel ve mekanik özelliklerini ortaya koyan bir çalışma niteliğindedir. Ayrıca, bu çalışmanın Lefke taşının yapı taşı olarak kullanılabilirliği ile ilgili ilk çalışma olmasından dolayı literatürde referans bir çalışma olarak yerini alacaktır. Doğal yapı taşı sektörü için bu çalışma unutulmaya yüz tutmuş olan Lefke taşı için bir farkındalık oluşturacaktır. Bu çalışma ile ortaya konulan Lefke taşının jeolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri yardımıyla açılması düşünülen ocak işletmesinin en uygun lokasyonu, taş kesme makinalarının seçimi, nakliye özellikleri, malzeme özellikleri, rezerv bilgisi ve üretilecek doğal yapıtaşlarının kullanım alanlarına uygunluğunun belirlenmesi gibi etkilerle endüstriye katkısı söz konusu olacaktır.

Lefke taşının farkındalığını arttırmak için daha çok araştırmalar yapıp bu araştırmaların literatürde yerini alması sağlanmalıdır. Bu konularda yapılacak ortak projelerin belediyeler, ticaret odaları, üniversiteler tarafından desteklenmesi proje sonuç çıktılarının çeşitliliğini arttıracaktır. Yerel belediye tarafından düzenlenecek üniversite destekli bir çalıştay veya tasarım atölyesi ulusal bazda taşın tanıtımına olumlu katkılar sağlayacaktır. Daha detaylı rezerv tespiti için belli noktalarda sondaj ve jeofizik ölçümler yapılması yerinde olacaktır. Detaylı rezerv tespitinden sonra bu çalışmanın sonuçlarından da yararlanılarak uygun bir lokasyonda açılacak olan bir taş ocağının yerel ekonomiye katkısı yeniden sağlanmalıdır.

## Teşekkür

Yazarlar İstanbul Ticaret Üniversitesi YAPKO birimine sağladığı finansal destek ve arazi çalışmaları esnasında lojistik destek veren Osmaneli Belediyesi'ne ve makalenin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen Jeo. Y. Müh. K. Ömer TAŞ'a teşekkür eder.

## Kaynaklar

- Anon. (1979). Classification of Rocks and Soils for Engineering Geological Mapping. Part 1-Rock and Soil Materials. Bull. Int. Ass. Eng. Geo. 19, 364-371.
- Arıoğlu, E., Arıoğlu, N., Girgin, C. (1999). Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Numune Şekil-Boyut Etkisi, Hazır Beton Dergisi, Sayı:31, 40-50.
- ASTM C616/C616M-15. (2015). Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5550-06. (2006). Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- BS 1881 (1983). Testing Concrete, Method for Determination of the Compressive Strength of Concrete Cores.
- Cooper, B., Kramer, S. (2014). Sydney Sandstone: Heritage Stone from Australia, EGU General Assembly Conference Abstracts, 16, 16465.
- Crocq, C. S. (2010). Building Stone in Alberta; Energy Resources Conservation Board, ERCB/AGS Open File Report 2010-01, 52 p.
- Çelik, M. Y. (2003). Dekoratif Doğal Yapı Taşlarının Kullanım Alanları ve Çeşitleri. Madencilik, 42 (1), 3-15.
- Çobanoğlu, İ., Çelik, S. B. (2017). Assessments on The Usability of Wide

- Wheel (Capon) Test as Reference Abrasion Test Method for Building Stones. *Construction and Building Materials*, 151, 319–330.
- Day, K.W. (1996). *Concrete Mix Design Quality Control and Specification*, Spon, England.
- Deere, D. U., Miller, R. P. (1966). *Engineering Classifications and Index Properties of Intact Rock*. Technical Report No: AFWL-TR 65-116, University of Illinois, 300 p.
- Duru, M., Gedik, İ. Aksay, A. (2002). 1:100 000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No:37 Adapazarı H-24 Paftası. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- Ekincioglu, G., Başbüyük, Z., Ekdur, E., Ballı, F. ve Kanbir, E. S. (2014). *Kırşehir Doğal Taş Sektör Analizi ve Yatırım İmkânları Raporu*, Ahiler Kalkınma Ajansı, Kırşehir, 102 sayfa.
- Erdem, P. N. (1981). *Mühendislik Jeolojisi*. İDMM Akademisi Yayınları, 156, İstanbul, 467 sayfa.
- Göncüoğlu, M. C., Turhan, N., Şentürk, K., Uysal, Ş., Özcan, A. ve Işık, A. (1996). Orta Sakarya’da Nallihan-Sarıcakaya arasındaki yapısal birliklerin jeolojik özellikleri. *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Rapor No:10094*, Ankara, 173 sayfa.
- Granit, Y., Tintant, H. (1960). *Observation Préliminaires Sur Le Jurassique De La Région De Bilecik (Turquie)*. C. R. Acad. Sci. Paris, 251, 1801-1803.
- Hockman, A. and Kessler, D. W. (1957). A study of the properties of the U.S. Capitol sandstone, National Bureau of Standards Report 4998, Gaithersburg, MD, 29 p.
- Kaya, A. C., Yapıcı, N., Anıl, M. (2008). *Midyat Taşının Kaplama ve Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. *Ç.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19 (3), 94-104.
- Kılıç, İ. (2017). Yapı Malzemesi Olarak Yenimuhacir Kumtaşının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, *Gaziosmanpaşa Üniversitesi Bilimsel Araştırma Dergisi*, 6 (3), 1-11.
- Kılıç, İ., Gültekin, A. H. (2011). The Physical Properties of Edirne (Keşan) Region Sandstones as Building Stone. 6<sup>th</sup> International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), Fırat University, 16-18 May 2011, Elâzığ / TURKEY, 228 – 232.
- Kılıç İ., Gültekin, A. H. (2017). Tarihi Edirne Gar Binasında Kullanılan Kumtaşlarında Görülen Bozulma Nedenleri, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 3, 56-67.
- Kumsar, H., Çelik, B. S. Aydan, Ö. and Ulusay, R. (2003). Aphrodisias: Anatolian Antique City of Building and Sculptural Stones. *Proceedings of the International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones*, 15-18 September 2003, İstanbul, E. Yüzer, H. Ergin and A. Tuğrul (eds.), 301-309.
- McCabe S., Smith B., Adamson C., Mullan D., McAllister D. (2011). The ‘Greening’ of Natural Stone Buildings: Quartz Sandstone Performance as a Secondary Indicator of Climate Change in the British Isles? *Atmospheric and Climate Sciences*, 1 (4), 165-171.
- Monday, J. G. L., Dhir R. K. (1984) “Assessment of In-Situ Concrete Quality by Core Testing” In *Situ/Nondestructive Testing of Concrete* (Editor: V. M. Malhotra) ACI Publication, SP-82.
- Onaran, K. (2014). *Malzeme Bilimi*, 13. Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383 sayfa.

- Özkan, S., Yaşar, E. (2007). Salbaş (Adana) Kumtaşlarının Fiziko-Mekanik ve Petrografik Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 112-120.
- Quick, G. W. (2002). CSIRO Selective Guide to The Specification of Dimension Stone. *Discovering Stone Magazine*, 1, 8-21.
- Saner, S. (1977). Geyve-Osmaneli-Gölpazarı-Taraklı Alanının Jeolojisi; Eski Çökeltme Alanları ve Çökeltmenin Evrimi. MTA Raporu, No: 6306 (İstanbul Üniversitesi Tatbiki Jeoloji Kürsüsü, Doktora Tezi).
- Saner, S. (1980). Mudurnu-Göynük Havzasının Jura ve Sonrası Çökeltim Nitelikleriyle Paleocoğrafik Yorumlaması. *T.J.K Bülteni*, 23, 39-52.
- Sangha C. M., Dhir, R. K., (1972). Strength and Complete Stress-Strain Relationship for Concrete Tested in Uniaxial Compression Under Different Test Conditions, *Material and Structures, RILEM*, Vol. 5, No. 30.
- TS 11145. (1993). Konglomera-Yapı ve Kaplama Taşı Olarak Kullanılan, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 10 sayfa.
- TS EN 1926. (2000). Doğal Taş Deney Metotları-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 10 sayfa.
- TS EN 1936. (2010). Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 10 sayfa.
- TS EN 12371. (2003). Dona Dayanım Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12 sayfa.
- TS EN 13161. (2009). Sabit Moment Altında Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 17 sayfa.
- TS EN 13755. (2009). Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 10 sayfa.
- TS EN 14157. (2017). Doğal Taşlar- Deney Yöntemleri-Aşınma Direncinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 19 sayfa.
- TS EN 14205. (2004). Doğal Taş Deney Metotları- Knoop Sertliğinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 11 sayfa.

## **Geological and Engineering Properties of Lefke Stone (Osmaneli /Bilecik) used as Natural Building Stone in Old Structures**

### **Extended abstract**

*Lefke stone is a kind of sandstone and it was widely used in the mosque, madrasa, churches and houses in the center of and around the Osmaneli district along with Istanbul Haydarpaşa train station, Eskişehir government mansion, Bebek and Bostancı mosques as building stone. However, there is no scientific literature about Lefke stone to be used as a building stone. A study investigating geological, physical and mechanical properties was carried out to fill this gap and to determine the building stone properties of the Lefke stone. The study area is in the southern part of Osmaneli (Bilecik) county in the Marmara Region. The sandstones outcropped near Osmaneli and named as Lefke stone have the characteristics of natural building stone. Lefke Stone is yellowish or greenish with massive, thick-medium-thin bedding and alternates with shale, marl, claystone and mudstone lithologies. The main properties affecting the strength of rocks are physical, mechanical, durability and mineralogical properties. It is very important to determine and relate these properties for*

*rocks to be used as building materials and in engineering projects. In this study, the geological features and building stone properties of the sandstone rocks outcropped in the southern part of the Osmaneli county of Bilecik province were investigated. Field and laboratory studies were carried out in order to evaluate Lefke stone as a building stone. The geological characteristics of the Lefke stone with field studies and its physical and mechanical properties with laboratory studies have been determined. While the field trips consisted of outcrop studies and taking samples, laboratory studies included the relevant tests in accordance with the standards (TSE, ASTM) to determine the physical and mechanical properties of the Lefke stone. The building stone properties of the Lefke Stone yielded an average apparent density of 2.38 g/cm<sup>3</sup>, a specific gravity of 2.68 g/cm<sup>3</sup>, a total porosity of 11.26%, a water absorption of 2.93% by weight, a uniaxial compressive strength of 94 MPa, a flexure strength of 11.45 MPa, a Mohs hardness of 4.5-5. The usability of Lefke sandstone as a building stone was assessed according to field observations and the help of values of physical and mechanical properties obtained from laboratory tests.*

**Keywords:** *Lefke Stone, Building stone, Sandstone, Osmaneli, Physical and Mechanical properties*





## Altın nanomalzeme sentezi ve karakterizasyonu

**Mehmet Fırat BARAN\***

Mardin Artuklu Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler Bölümü, Mardin  
[mfiratbaran@gmail.com](mailto:mfiratbaran@gmail.com) ORCID: 0000-0001-8133-6670 Tel:05443204421

**Abdurrahman SAYDUT**

Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[saydut@dicle.edu.tr](mailto:saydut@dicle.edu.tr) ORCID: 0000-0002-6112-9209 Tel:05327727563

Geliş: 10.04.2019, Revizyon: 26.04.2019, Kabul Tarihi: 29.04.2019

### Öz

Nanobiyoteknoloji, nanobilim ve teknolojide çarpıcı ve en hızlı gelişen alanlardan biridir. Altın nanopartikülleri (AuNP'ler), yeşil sentez ile herhangi bir yüzey aktif madde, stabilizatör ve kimyasal madde kullanılmadan bittim (*Pistacia terebinthus*) yaprak özütü kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen AuNP'lerin karakterizasyonu UV-vis, SEM-EDX, XRD, FTIR ve TGA-DTA ile yapıldı. SEM-EDX, analizi incelendiğinde sentezlenen nanomalzemelerin kristal boyutunun 100 nm'nin altında olduğu ve kristal yapısının küresel olduğu anlaşılmaktadır. UV-vis, analizi verileri gösterdiği oda koşullarında farklı zaman aralıklarında yapılan ölçümler sonucunda renk değişimi ile maksimum dalga boyunun 335 nm'de karakteristik pik verdiği görüldü. XRD analizi verilerinden kristal yapılarının boyutu 14.37 nm büyüklükte olduğu hesaplandı. Ayrıca çalışmamızda sentezlenen nanomalzemenin TGA-DTA analizi yapılarak nanoparçacıkların 1000 oC 'ye kadar dayanıklı olduğu rapor edildi.

**Anahtar kelimeler:** Altın nanomalzeme, yeşil sentez, UV-Vis, XRD, TGA-DTA.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Son zamanlarda nanoteknoloji alanında, özel gereksinimlere bağlı olarak farklı şekil ve boyutta nanoparçacıkların sentezlenmesi için sayısız yöntemler geliştirilmiştir.(Shankar vd. 2004). Metal nanopartiküllerden biri olan altın nanoparçacıkları (AuNP'ler), farklı bir biyolojik yapıya sahiptirler. AuNP'lerin elektronik, yapısal olarak, manyetik, optik ve katalitik özelliklerinden dolayı malzeme bilimi ve moleküler biyoteknolojide kullanılmaktadır

Ayrıca, metal nanoparçacıkların katı tekstil boyalarının ve tekstil polimerinin makromoleküllerini giderme de kullanıldığı görülmektedir(Emam, vd., 2017).

Gümüş, altın, kadmiyum, bakır, çinko ve platin gibi bazı metal nanoparçacıklar, fiziksel ve kimyasal yöntemler dahil olmak üzere farklı metotlar kullanılarak yaygın olarak sentezlenmektedir. Bu metotların çevresel, biyolojik, yüksek enerji tüketimi ve toksik kimyasalların kullanımı gibi sayısız dezavantaja sahiptirler. Araştırmacılar kimyasal indirgeme deki dezavantajları bertaraf etmek için sayısız metotlar denemişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar biyouyumlu nanoparçacıkların sentezi için çevre dostu, toksik madde içermeyen, basit ve kolay yöntem olan biyolojik sentez kullanmaya başladılar (Kumar vd. 2018)(Acay, vd., 2019),(Eren ve baran 2019). Bizim de bu kapsamda yaptığımız literatür taramasından sonra biyolojik kaynaklı altın nanopartiküllerini bittim (*Pistacia terebinthus*) özütü kullanılarak sentezledik.

## Materyal ve Yöntem

Türkiye'nin Siirt ilinde toplanan Bittim (*Pistacia terebinthus*) bitkisinin yeşil yaprakları toplandı. Bol su ile yıkandıktan sonra saf su ile beş defa yıkama yapıldı. Temizlenen yapraklar özüt hazırlamak için oda koşullarında kurutuldu. 100 gr alınıp 1000 ml distile su ile karıştırılıp

kaynatılmaya bırakıldı. Oda koşullarında soğutulduktan sonra süzme işlemine tabi tutuldu. Elde edilen özüt +4 °C'de deneysel işlemlerde kullanılmak üzere muhafaza edildi. Sigma-Aldrich marka 49.0 % saflıkta altın triklorür ( $\text{HAuCl}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ile 1 mM altın çözelti hazırlandı. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere difrize bırakıldı.



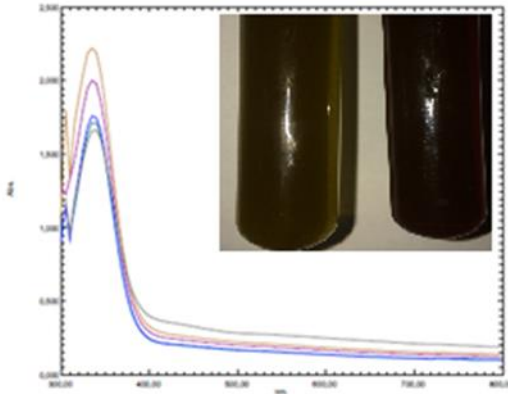
Şekil 1. Bittim bitkisinin görüntüsü

Bittim (*Pistacia terebinthus*) bitkisinden elde edilen 100 ml Özüt ve 300 ml altın ( $\text{HAuCl}_3$ ) çözeltisi bir kap içerisine ilave edilerek oda koşullarında durgun bir şekilde reaksiyona bırakıldı. Renk değişimi zamana bağlı olarak 60 dakika boyunca gözlemlendi. Agilent Cary 60 UV-visible spektroskopisi kullanılarak oluşan renk değişimi için absorbans değerleri ölçüldü.  $\text{HAuCl}_3$ 'lerin oluşumu bu renk değişiminden de anlaşılacağı üzere UV-vis. cihazında maksimum dalga boyu ölçüldü. FT-IR analizi, Perkin Elmer Spektrum One cihazı kullanılarak indirgemenin sorumlu fitokimyasalları değerlendirmek için fonksiyonel gruplar incelendi. Sıvı halde ki sentez sonrası içeriği Eppendorf Centrifuge 5804 model cihaz ile 5.000 rpm de 10 dakika santrifüj ederek diğer karakterizasyon adımları için kullanılacak partiküller çöktürüldü. Partiküller 70°C kurutuldu. RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi (EDX) ile partiküllerin element kompozisyonu değerlendirildi, taramalı elektron mikroskobu EVO 40 LEQ

(SEM) verileri ile morfolojik görüntüleri incelendi. RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi (XRD) analiziyle partiküllerin kristal yapısı değerlendirildi. Kristal tanecik boyutu Debye-Scherrer eşitliği kullanılarak yapıldı, Shimadzu TGA-50 cihazı kullanarak TGA-DTA cihazı ile de nanomalzemenin hangi sıcaklıklarda yüzde kaybının bozunduğunu görmek için kullanıldı.

## Bulgular ve Tartışma

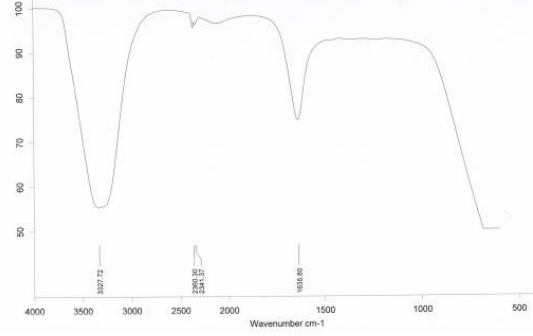
Sentezlenen çalışmada indirgenmenin görülebilmesi için UV-vis spektroskopisinde farklı zaman aralıklarında (5, 10, 20, 30, 40, 50 ve 60 dakika) alınan örneklerle altın nanomalzemesinin oluşumu renk değişimine bağlı olarak gözlemlenmiştir. Bu renk değişimi açık sarı renkten koyu mor rene doğru gidildiği rapor edilmiştir. Yapılan AuNP'lere özgü olan yaklaşık maksimum 335 nm'de keskin bir pik göstermiştir (Şekil 1). Benzer çalışmalarda yapılan UV-vis analizinde altın nanopartiküllerin 270-530 nm arasında farklı dalga boyunda oluşumu görülmüştür (Vellaichamy, vd., 2018).



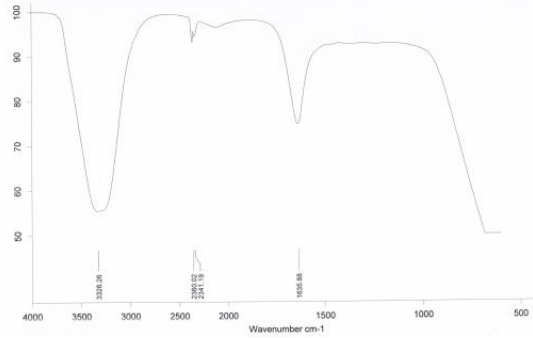
Şekil 2. Altın nanopartiküllerin UV-vis Analiz Sonucu Verileri.

FT-IR spektrumunda bittim yapraklarından elde edilen özüt ve H<sub>2</sub>AuCl<sub>3</sub> ile muamele edildikten sonra analizi yapıldı (şekil 2.). Altın nanomalzemelerin (AuNP) oluşumu esnasında yani indirgemede görev alan fonksiyonel gruplar incelenmiştir. 3326 cm<sup>-1</sup> de ki pikin -OH gerilmesi, 1636 cm<sup>-1</sup> de ki pikin -C=O veya -C=C ait olabileceği 2360 cm<sup>-1</sup> de ki pikin aldehite bağlı -C-H

gerilmesi olabileceği düşünülmektedir. Nanomalzeme oluşurken indirgemede -OH, -C-H ve C=O gruplarındaki değişimler şekil 3'te görülmektedir. AuNP'lerin eldesi için yapılan sentez çalışmalarında indirgemenin benzer fonksiyonel grupların rol adığını rapor etmişlerdir (Geethalakshmi ve sarada 2013),(Laksee vd. 2018).



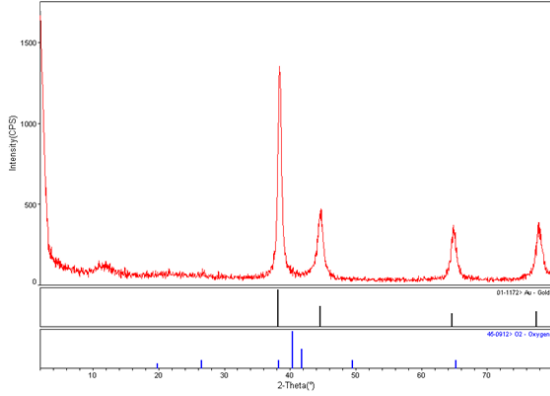
Şekil 3. a. Bittim yaprağından elde edilen özütün FT-IR Analiz Sonucu Verileri.



Şekil 3. b. Sentez sonrası bittim (Pistacia terebinthus) bitkisinde var olan fonksiyonel gruplarıdaki değişim.

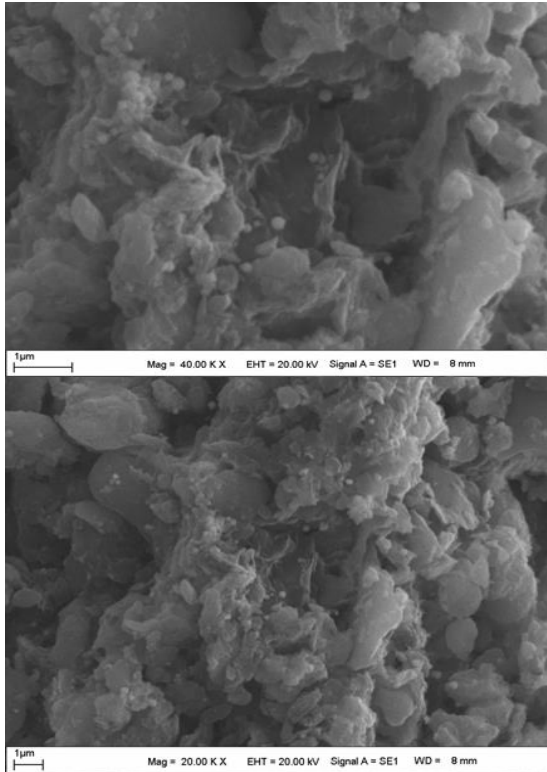
Altın nanoparçacıklarının XRD sonuçları incelendiğinde 2θ'ya karşılık gelen 111°, 200°, 220° ve 311° de bulunan pikler altının kübik kristal yapısını göstermektedir (Mythili vd. 2018)( Kumar, vd., 2019). Bu piklere karşılık gelen değerlerden (38.44, 44.52, 64.84 ve 78.18) AuNP'lerin kristal boyutu Debye-Scherrer formülü kullanılarak 14.37 nm olarak bulunmuştur. Ayrıca şekil 4. 'te görüldüğü üzere faz diyagramında elde edilen altın nanomalzemelerin elementel yapıda olduğu anlaşılmaktadır.

$D = K\lambda / (\beta \cos\theta)$  eşitsizliğinden hesaplanmıştır (Eren ve baran 2019).



Şekil 4. AuNP'lerin XRD ve faz analizi.

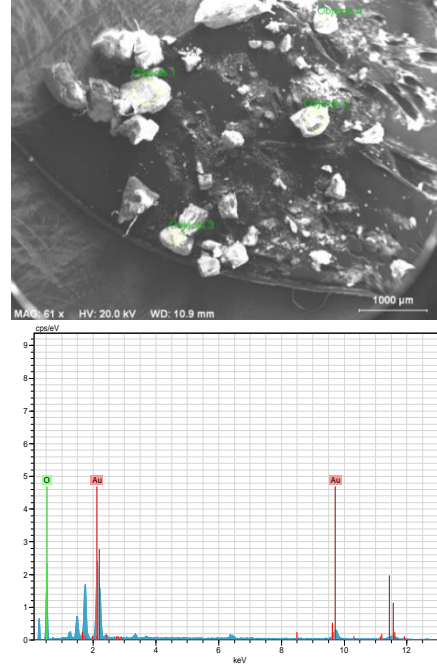
SEM analizi sentezlenen nanomalzemenin boyutu ve morfolojik özelliklerinin aydınlatılmasında kullanılmaktadır (Umamaheswari, vd., 2018). SEM analiz verilerini incelediğimizde AuNP'lerin küresel görünümde olduğu tespit edilmiştir (şekil 5.). SEM verileri gösterdiği nanomalzemelerin 100 nm'nin altında olduğu bu sonucunda XRD sonuçlarıyla uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 5. Altın nanoparçacıklarının SEM sonuçları.

Elde edilen AuNP'lerde altın elementinin varlığının doğrulanması için EDX

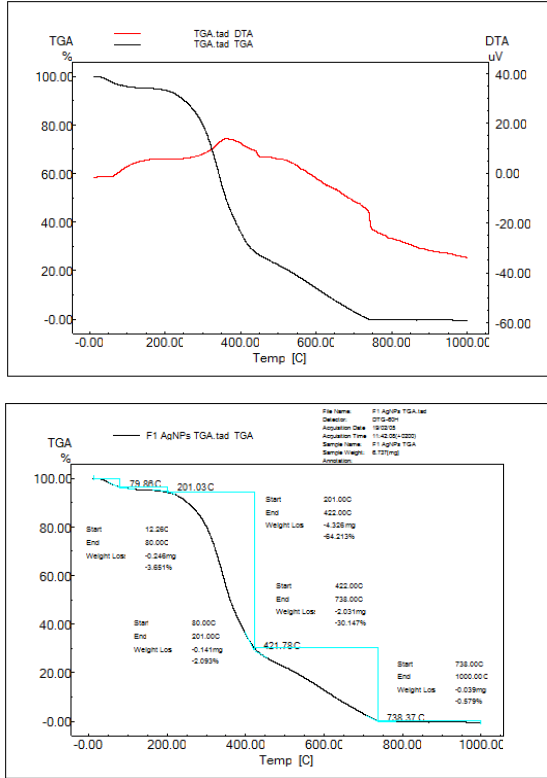
spektroskopisi kullanıldı (Geethalakshmi ve Sarada 2013) (Dubey, vd., 2010) EDX analizi sonucunda elde ettiğimiz altın nano malzemelerinin elementel yapıda olduğu şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. AuNP'lerin EDX analizi ile element kompozisyonlarının incelenmesi.

TGA –DTA bulguları sonucunda AgNP'lerin 10-1000 °C arasında maddenin bozunma verileri 10 °C/dak ısıtma hızıyla N<sub>2</sub>(g) atmosferinde 20 mL/dak akış hızıyla analiz edildi (Patra, 2016),(Baran, 2019). TGA-DTA eğrisi incelendiğinde 10-201 oC de ki yüzde 5.5'lik kütle kaybının nemden kaynaklandığı, 201-422 °C de ki yüzde 64'lük kütle kaybının suyun bitki özütünde var olan biyoorganik yapılardan ve suyun desorpsiyonundan meydana geldiği, 422-1000 °C de ki kütlece yüzde 0.58'lik kütle kaybının nano malzemenin artık yavaş yavaş bozunduğunu göstermektedir (şekil 7). Bu sonuçlar gösterdiği elde edilen malzemenin yüksek sıcaklıkta bile dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır. Benzer çalışmalarla uyumlu olduğu ve sonuçların önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir (Singh vd. 2017)

(Baran, 2019) (Acay, vd., 2019).



Şekil 7. Sentezlenen altın nanopartiküllerin TGA-DTA verileri.

## Sonuç ve öneriler

## Kaynaklar

- Acay, A, Baran, M. F. ve Eren, A. 2019. "Investigating Antimicrobial Activity Of Silver Nanoparticles Produced Through Green Synthesis Using Leaf Extract Of Common Grape (*vitis vinifera*)". 17(2): 4539–46.
- Baran, M. F. 2019. "Alıç Bitkisinin Yaprak Özütü Kullanılarak AgNP'erin Yeşil Sentezi ve Anti Mikrobiyal Aktivitelerinin Değerlendirilmesi: Fen Bilimleri ve Matematik Alanında Araştırma ve değerlendirmeler, 111–120.
- Baran, M.F., 2019. "Prunus avium kiraz yaprağı özütü ile gümüş nanopartikül (AgNP) sentezi ve antimikrobiyal etkisinin incelenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi 10:1 (2019) : 221-227.

Nano malzemelerin üretimi için çevre dostu sentez yöntemlerinin kullanılmasının nedenlerinden olan toksik kimyasal içermemeleri, ucuz ve sentez sürecinin daha kolay olması gibi faktörlerdir. Bu malzemelerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Yaptığımız çalışmada bittim bitkisine ait yapraklardan elde ettiğimiz özüt ile AuNP'leri kolay, ucuz, çevre dostu yöntemle ve oda koşullarında sentez işlemini gerçekleştirdik. Nanomalzemenin 335 nm maksimum absorbansa sahip küresel görünümde olduğu ve kristal tanecik boyutunun 14.37 nm olduğunu hesapladık. Bu AuNP'lerin bozunma sıcaklıklarını 1000 °C'ye kadar dayanıklı olduğu görüldü. Elde ettiğimiz AuNP'ler geliştirilerek ilaç, medikal sanayinde, atık su ve boya gideriminde gibi farklı bir çok alanda kullanılabilirler. Nano malzemenin 10-1000 °C de bile dayanıklı olduğu TGA-DTA analizinde rapor edilmiştir.

Sonuç olarak bittim yaprak özütü ile altın nano malzemelerinin yeşil sentezi gerçekleştirildi.

- Dubey, S.P., Lahtinen, M., Sillanpää, M., 2010. Green synthesis and characterizations of silver and gold nanoparticles using leaf extract of Rosa rugosa. Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 364, 34–41.
- El-Batal, A.I., Al-Hazmi, N.E., Mosallam, F.M., El-Sayyad, G.S., 2018. Biogenic synthesis of copper nanoparticles by natural polysaccharides and Pleurotus ostreatus fermented fenugreek using gamma rays with antioxidant and antimicrobial potential towards some wound pathogens. Microb. Pathog. 118, 159–169.
- Kumar, V., Singh, D.K., Mohan, S., Gundampati, R.K., Hasan, S.H., 2017. Photoinduced green synthesis of silver nanoparticles using aqueous extract of Physalis angulata and its antibacterial and antioxidant activity. J. Environ. Chem. Eng. 5, 744–756.

- Owaid, M.N., Raman, J., Lakshmanan, H., Al-Saeedi, S.S.S., Sabaratnam, V., Ali Abed, I., 2015. Mycosynthesis of silver nanoparticles by *Pleurotus cornucopiae* var. *citrinopileatus* and its inhibitory effects against *Candida* sp. *Mater. Lett.* 153, 186–190.
- Saravanakumar, K., Chelliah, R., Shanmugam, S., Varukattu, N.B., Oh, D.H., Kathiresan, K., Wang, M.H., 2018. Green synthesis and characterization of biologically active nanosilver from seed extract of *Gardenia jasminoides* Ellis. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*
- Emam, H. E., Nancy S. El-Hawary, ve H. Ahmed., B. 2017. “Green technology for durable finishing of viscose fibers via self-formation of AuNPs”. *International Journal of Biological Macromolecules* 96: 697–705. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.12.080>.
- Eren, A, ve Baran. M.F., 2019. “Green Synthesis , Characterization And Antimicrobial Activity Of Silver Nanoparticles ( AgNPs ) from maize (*zea mays*)”. 17(2): 4097–4105.
- Geethalakshmi, R., ve Sarada, D. V L. 2013. “Characterization and antimicrobial activity of gold and silver nanoparticles synthesized using saponin isolated from *Trianthema decandra* L.” *Industrial Crops and Products* 51: 107–15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.055>.
- Kumar, V., Mary, P., Jelastin Kala, S. ve Prakash, K. S., 2019. “Green synthesis of gold nanoparticles using *Croton Caudatus* Geisel leaf extract and their biological studies”. *Materials Letters* 236: 19–22. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.10.025>.
- Kumar, P. Saravana, M. Vimalin J, Malathi, J., ve Ignacimuthu, S. 2018. “Anticancer effects of one-pot synthesized biogenic gold nanoparticles (Mc-AuNps) against laryngeal carcinoma”. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* 44(18):118–28. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2017.12.008>.
- Laksee, S., Puthong, S., Kongkaviton, P., Tanapat P, Nongnuj M., 2018. “Facile and green synthesis of pullulan derivative-stabilized Au nanoparticles as drug carriers for enhancing anticancer activity”. *Carbohydrate Polymers* 198(March): 495–508. [doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.119](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.119).
- Mythili, R., Selvankumar, T., Srinivasan, P. Sengottaiyan, A., Sabastinraj, J., Al-Sabri, A.F., Ahmed, K.K., Govarthan, S. M., Kim, H. 2018. “Biogenic synthesis, characterization and antibacterial activity of gold nanoparticles synthesised from vegetable waste”. *Journal of Molecular Liquids* 262: 318–21. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.087>.
- Patra, J. K., Das, G., ve Baek, K. H. (2016). Phyto-mediated biosynthesis of silver nanoparticles using the rind extract of watermelon (*Citrullus lanatus*) under photo-catalyzed condition and investigation of its antibacterial, anticandidal and antioxidant efficacy. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 161, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.05.021>
- Shankar, S. Shiv, Akhilesh Rai, Absar Ahmad, ve Murali Sastry. 2004. “Rapid synthesis of Au, Ag, and bimetallic Au core-Ag shell nanoparticles using *Neem (Azadirachta indica)* leaf broth”. *Journal of Colloid and Interface Science* 275(2): 496–502.
- Singh, Ankit Kumar vd. 2017. “Photo-induced biosynthesis of silver nanoparticles from aqueous extract of *Dunaliella salina* and their anticancer potential”. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 166: 202–11. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1011134416309241>.
- Umamaheswari, C, Lakshmanan, A., ve Nagarajan. N. S., 2018. “Green synthesis, characterization and catalytic degradation studies of gold nanoparticles against

congo red and methyl orange”. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology* 178: 33–39.  
[www.elsevier.com/locate/jphotobiol](http://www.elsevier.com/locate/jphotobiol).

Vellaichamy, B., Prakash, P., ve Thomas, J., 2018. “Synthesis of AuNPs@RGO nanosheets for sustainable catalysis toward nitrophenols reduction”. *Ultrasonics Sonochemistry* 48(May): 362–69.

## Gold nanomaterial synthesis and characterization

### Extended abstract

Some metal nanoparticles, such as silver, gold, cadmium, copper, zinc and platinum, are widely synthesized using different methods, including physical and chemical methods. These methods have numerous disadvantages such as environmental, biological, high energy consumption and the use of toxic chemicals. Researchers have tried numerous methods to overcome the disadvantages of chemical reduction. As a result, the researchers began using biomarkers for the synthesis of biocompatible nanoparticles, which are environmentally friendly, free of toxic substances, simple and easy method.

For this reason, one of the most essential needs in nanotechnology is to develop environmentally friendly and green approaches in nanomaterials synthesis. Ultra-sonication has been successfully used for the synthesis of nanomaterials in recent years.

AuNPs are used in material science and molecular biotechnology due to their electronic, structural, magnetic, optical and catalytic properties. Nanobiotechnology is one of the striking and fastest growing areas in nanoscience and technology.

Gold nanoparticles (AuNPs) were obtained from green syntheses using *Pistacia terebinthus* leaf extract without any surfactants, stabilizers or chemicals. The characterization of the obtained AuNPs was done by UV-vis, SEM-EDX, XRD, FTIR and TGA-DTA. When the SEM-EDX analysis is analyzed, it is understood that the synthesized nanomaterials have a crystal size below 100 nm and the crystal structure is spherical. UV-vis, analysis data showed that the measurement of the room conditions at different time intervals as a result of color

change with the maximum wavelength was given peak characteristic at 335 nm. From the XRD analysis data, the crystal structures were calculated to be 14.37 nm in size. In addition, nanoparticles were reported to be resistant to 1000 °C by TGA-DTA analysis. As a result of TGA and DTA findings, the degradation data of the AgNPs between 10-1000 °C were analyzed at a flow rate of 20 mL / min in the N<sub>2</sub> (g) atmosphere with a heating rate of 10 °C /min. The synthetic procedure is very simple, greener and no need of any capping agent. This procedure is easy to scale up, and therefore a large scale production of particles is also possible. When the XRD results of gold nanoparticles are examined, the peaks at 111°, 200°, 220° and 311° corresponding to 2 theta indicate the spherical crystal structure of gold.

The AuNPs samples showing similarly characteristic peaks of metallic gold.

SEM analysis is used to clarify the size and morphological characteristics of synthesized nanomaterials. Analysis through energy dispersive X-ray (EDX) spectrometry confirmed the presence of elemental gold signal of gold nano particles. As a result, vegetable wastes can be used efficiently in the synthesis of nano materials.

The use of biological materials for the rapid and stable synthesis of AuNPs is rapidly increasing. These simple, low-cost, non-toxic and abundant plant sources can be used as an alternative to other biological materials.

Such waste materials for the synthesis of AuNPs will be very advantageous as biological waste materials can be converted into potentially valuable nano-materials. This study led to a horizon of researchers to the use of biological resources for the synthesis of nanoparticles.

**Keywords:** Gold nanomaterials, green synthesis, UV-Vis, XRD and TGA-DTA.





## Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 jeotermal sondajında kontrolsüz püskürmenin önlenmesi

**İbrahim Utku ERMİŞ\***

MTA Orta Anadolu İkinci Bölge Müdürlüğü, 42250 Selçuklu, Konya  
[utkuermis71@gmail.com](mailto:utkuermis71@gmail.com) ORCID: 0000-0003-3182-2843, Tel: (332) 255 03 07

Geliş: 14.05.2019, Revizyon: 15.08.2019, Kabul Tarihi: 21.08.2019

### Öz

*Dünya ölçeğinde jeotermal enerji kullanımında son yıllarda dikkate değer bir artış gözlemlenmiştir. Ülkemizde de yaklaşık 45 yıldan beri jeotermal enerji aramaları yapılmaktadır. Bir jeotermal enerji kaynağını açığa çıkarmanın başlıca yolu ise sondaj çalışmasıdır. Jeotermal sondaj çalışmaları yüksek operasyon maliyetleri içerir. Bir kuyunun amacına uygun olarak tamamlanması ise bu anlamda büyük önem taşır. Jeotermal akışkanlar genelde kapalı bir sistemde bulunur. Böyle bir sistemde sondaj yapılırken açığa çıkan su ve gaz bazen kuyu hidroliğini yenerek kontrolsüz püskürmeye (blow out) neden olabilir. Kontrol altına alınamayan kontrolsüz püskürme sadece iş kazalarına ve işçi yaralanmalarına değil kuyunun tamamen elden çıkması gibi ciddi sonuçlara neden olabilir.*

*Bu çalışmada MTA Genel Müdürlüğü tarafından yapılan Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 sondaj kuyusunda karşılaşılan kontrolsüz püskürme ve bunun kontrol altına alınmasından bahsedilmiş, yapılan hesaplamalar neticesinde rezervuar basıncı ve bunu yenecek çamurun ağırlığı ve miktarı hesaplanmıştır.*

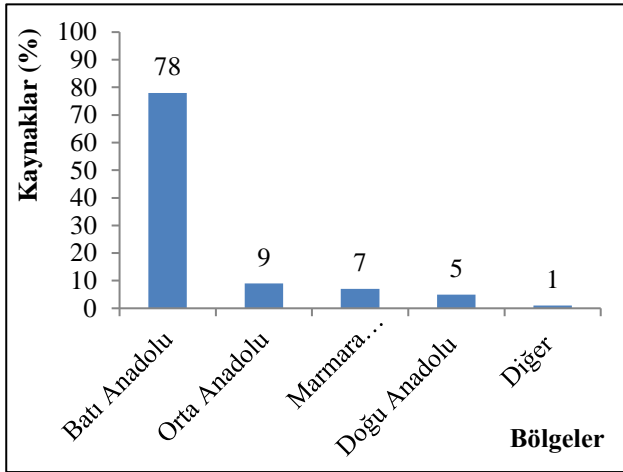
**Anahtar Kelimeler:** kontrolsüz püskürme, jeotermal enerji, sondaj.

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Jeotermal enerji yenilenebilir ve çevre ile barışık bir yeraltı kaynağıdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı bilgi merkezi verilerine göre dünyada jeotermal enerjiden elektrik üretimi 2018 yılı itibarıyla 14369 GWe düzeyindedir. Bu dönemde elektrik dışı jeotermal enerji üretimi ise 70000 MW<sub>t</sub>'i aşmıştır.

Türkiye son yıllarda jeotermal enerji aramalarına hız vererek bu alanda önemli bir ülke konumuna gelmiştir. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) öncülüğünde başlatılan bu çalışmalar son yıllarda özel sektörün de bu alana ilgi göstermesiyle hız kazanmış ve ülkemizde 239 adet jeotermal alan ortaya çıkarılmıştır. Bu alanların bölgelere göre dağılımı Şekil 1.'de verilmiştir. (ETKB, 2019)



Şekil 1. Türkiye jeotermal alanları

Şekil 1'de görüldüğü üzere Türkiye jeotermal enerji alanları Batı Anadolu bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Bunun nedeni bölgedeki aktif tektonik geçmiş, genç volkanizma ve faylanmaların çokluğudur. Bununla beraber ülkemizdeki jeotermal enerji alanlarının %94'ü düşük entalpidir. (Ermiş, 2016). Sahalardan elde edilen jeotermal akışkanlar ısıtmadan, seracılığa, elektrik üretiminden, termal ve kaplıca turizmine, sağlık alanından tarımsal

uygulamalara kadar birçok değişik alanda değerlendirilmektedir. (Arslan vd. 2004).

Bir jeotermal akışkandan nasıl yararlanılacağını belirlemek amacıyla uluslar arası ölçekte çeşitli sınıflandırma araçları kullanılsa da bunlar arasında en yaygın kullanılanı Lindal Diyagramı'dır. Bu diyagram bir jeotermal akışkanın sıcaklığına bağlı olarak o akışkanın kullanım alanını belirleyen bir sınıflandırma aracıdır Tablo 1.'de Lindal Diyagramı verilmiştir (Toka,2014)

Tablo 1. Lindal Diyagramı

°C	Jeotermal akışkanın kullanım alanı
180	Yüksek konsantrasyonlu solüsyonların buharlaştırılması, amonyum absorpsiyonu ile soğutma, elektrik üretimi.
170	Diatomitlerin soğutulması, ağır su ve hidrojen sülfid eldesi.
160	Kereste kurutma, balık kurutma
150	Bayer metodu ile alüminyum eldesi.
140	Konservecilikte, çiftlik ürünlerinin kurutulması
130	Şeker endüstrisi, tuz endüstrisi.
120	Distilasyon, temiz su eldesi.
110	Çimento kurutma.
100	Organik madde kurutma (deniz yosunu, çimen sebze) yün yıkama ve kurutma.
90	Stok balık kurutma.
80	Yer ve sera ısıtma.
70	Alt sıcak limiti soğutma.
60	Sera, ahır ve kümes ısıtma.
50	Mantar yetiştirme, balneoterapi hamamları.
40	Toprak ısıtma.
30	Yüzme havuzları, fermantasyon işlemleri, damıtma
20	Balık çiftlikleri.

## Sondaj Çalışmaları

### Sondaja ait genel bilgiler

Ülkemizde Maden Tetkik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından uzun yıllardan beri jeotermal enerji aramaları yapılmaktadır. Kurum bu çalışmaları jeoloji, jeofizik ve maden mühendisliği disiplinlerinin ortak çalışmaları ile

sürdürmektedir. Bu çalışmalar kapsamında başlangıçta muhtemel jeotermal akışkan içeren bir saha belirlenmekte, sonra bu sahada sırasıyla; jeolojik gözlem ve araştırmalar ile jeofizik ölçümler yapılmaktadır. Son aşamada jeotermal akışkanın olma olasılığı en yüksek olan noktalarda belirli bir derinlikte sondaj faaliyeti planlanmaktadır. Bu plan kapsamında kuyu derinliğine bağlı olarak; kullanılacak sondaj makinesi, malzeme ve ekipmanı, kuyu teçhizi, gerekli eleman sayısı ve yaklaşık sondaj süresi belirlenmektedir. En nihayetinde bir jeotermal akışkan elde etmek amacıyla sondaj çalışmaları planlanan amaca uygun bir şekilde tamamlanmaktadır. İlgili kurum benzer bir amaçla Ankara ve çevresinde bulunan jeotermal kaynak alanlarını ortaya çıkarmak için, 2013 yılında “Ankara ve Civarı Jeotermal Enerji Aramaları Projesi” adı altında bir çalışma yürütmüştür. Proje kapsamında jeolojik etüt, jeokimya, jeofizik ölçümler yapılarak Yenikayı köyünde bir sondaj kuyusu açılmasına karar verilmiştir.

Yapılan 1296 m. kazı neticesinde Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 kuyusundan 51.93 l/sn artezyene sahip 59.60 °C sıcakta akışkan elde edilmiştir (Bülbül, 2014).

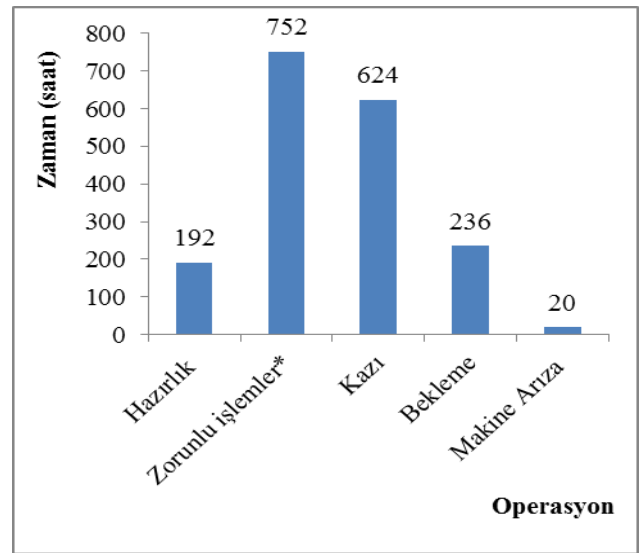
Sondaj faaliyeti esnasında 6 adet mühendis, 6 sondaj operatörü ve 12 adet sondaj işçisi çalıştırılmıştır. Mühendis ve sondaj operatörleri MTA'nın personeli iken sondaj işçileri mahallinden geçici süreliğine temin edilmiştir. Kazı işlemi MTA envanterinde kayıtlı bulunan 1969 model GD-3000 sondaj makinesi ile gerçekleştirilmiştir (Ermiş, 2014). Makine teknik özellikleri Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 2. GD-3000 sondaj makinesi özellikleri

Makine	GD - 3000	
Ülke/Firma	USA	GARDNER DENVER
Max. kanca kapasitesi (t.)	45	
Max. kule çekme kap. (t.)	75	
Swifell kapasitesi (t)	75	
Delme kapasitesi(m)	1129 (4 ½" DP)	

	1403 (3 ½" DP)
Kule yüksekliği 8m)	26.20
Motor sayısı/ toplam güç(HP)	2 / 624
Sondaj halat çapı (mm.)	22.3
Travelling blok donanım sayısı	6
Donanımdaki bir halat kapasitesi (t.)	11.350
Vites durumu	3-1R
Roraty çapı (inch)	18
Roraty yüksekliği (m.)	3.70
Pompa sayısı /tipi	1/2PN340 1 /FZ-FXX
DP depolama kapasitesi	1068 (4 ½" DP) 1646 (3 ½" DP)

Sondaj ve yedek malzemelerinin sondaj lokasyonuna nakliyatından sonra 04.05.2013 tarihinde kuyunun kazı işlemine başlanmış, 76 gün sonunda kuyu amacına uygun olarak tamamlanmıştır. Kuyuda yapılan işlemlerin zamansal dağılımının analizi Şekil 2.'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere; manevra, kuyu tarama, çamur hazırlama, çimentolama, asitleme vb zorunlu işlemler operasyonlar içerisinde önemli bir yer tutmuştur.



Şekil 2. ASY-2013/7 kuyusu zaman analizi (\*: kuyu tarama, manevra, çimentolama, çamur hazırlama, çimentolama, asitleme)

\*\* : malzeme, su, bekleme, kuyunun üretime açılmasını bekleme

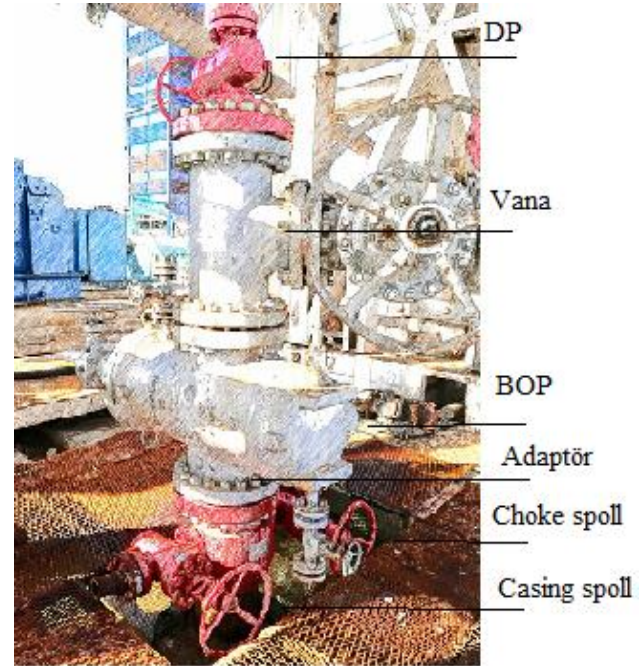
### ASY-2013/7 oluşun kuyusunda (kontROLSÜZ pÜSKÜRME (blow out)) önlenmesi ve yapılan kuyu hesaplamaları

Son yıllarda katkı maddesi olarak çeşitli polimerler geliştirilmiş olsa da sondaj çamurunun temel maddesi su ve bentonittir. Bentonit; montmorillonit grubu bir kil olup su ile karıştırıldığında çok iyi genişerek ideal bir çamur oluşturmaktadır. Bir sondaj çamurunun genel işlevi; ilerleme esnasında matkabın çalışmasıyla kuyuda oluşan kırıntıyı yüzeye taşımak, statik bir basınç oluşturarak kuyu içi dengeyi sağlamak, kuyu çeperinde sıvama yaparak yıkıntıları önlemek, matkabi soğutmak ve bir nevi yağlamak böylece kullanım ömrünü uzatmak ayrıca matkabın formasyonu kesmesine yardımcı olmak gibi sıralanabilir. Bunun yanında akışkan gelişi (sıvı veya gaz) muhtemel sahalarda bir sütün basıncı oluşturarak kontROLSÜZ pÜSKÜRME (blow out) önüne geçmek te sondaj çamurunun işlevleri arasında sayılabilir.

Oluşum şartları gereğince, jeotermal sahalarda sondaj yapılırken, kuyudan ani olarak gaz ve/veya akışkan gelişleri ile karşılaşılması mümkündür. KontROLSÜZ pÜSKÜRME olarak ifade edilen bu durumun bertaraf edilerek çalışmalar esnasında kuyunun stabil bir durumda tutulması ve kuyu emniyetinin sağlanması önemli bir konudur. Bundan dolayı jeotermal sondajlar planlanırken kuyu başı teçhizi ve teçhiz elemanları önceden belirlenir. Başta kontROLSÜZ pÜSKÜRME esnasında kuyuyu ağzını kapatarak gelişi kontrol altına almak amacıyla kuyu başında muhafaza borularının üzerine yerleştirilen BOP (blow out preventer) vana olmak üzere, vana ve çeşitli ekipman arasında geçişleri sağlayan flanş ve adaptörler, kuyudan gelen akışkan ve gazın tahliye edildiği ve kuyuya gerekirse dışarıdan çamurla müdahale etme amacıyla kullanılan muhafaza boruları (casing) üzerine yerleştirilen ve üzerinde kuyu basıncını ölçmeye yarayan manometre bulunan yardımcı vana (spool) bağlantıları vb materyaller bu teçhizin ana unsurlarını oluşturur. Şekil 3.'te tipik bir kuyu başı teçhizi görülmektedir. Kuyudan ani bir "geliş" olması durumunda takım dizisini içine alacak yapıda

tasarlanmış olan BOP vanası kapatılarak kuyu kontrol altına alınır. KontROLSÜZ pÜSKÜRME neden olan rezervuarın basıncı tespit edilerek bu basıncı baskılayacak "ağır çamurun" ağırlığı hesaplanır. Hesaplar neticesinde hazırlanan "ağır çamur" kuyuya basılarak pÜSKÜRME sonlandırılır.

Son yıllarda çeşitli polimerler kullanılsa da sondaj çamurunun temel katkı maddesi bentonittir. Bentonit; montmorillonit grubu bir kil olup su ile karıştırıldığında çok iyi genişerek ideal bir sondaj çamuru oluşturmaktadır. Sondaj çamurlarının genel işlevleri; kuyuda ilerleme esnasında matkabın çalışmasıyla oluşan kırıntıyı yüzeye taşımak, kuyu içerisinde statik bir basınç oluşturarak kuyu içi dengeyi sağlamak, kuyu çeperinde ince bir sıvama yaparak yıkıntıları önlemek, matkabi soğutmak ve bir nevi yağlamak böylece kullanım ömrünü uzatmak ayrıca matkabın formasyonu kesmesine yardımcı olmak gibi sıralanabilir. Bunun yanında akışkan gelişi (sıvı veya gaz) muhtemel sahalarda bir sütün basıncı oluşturarak kontROLSÜZ pÜSKÜRME önüne geçmektir.



Şekil 3. Tipik bir kuyu başı teçhizi.

Sondaj işlemini 1296 m’de sona eren ASY-2013/7 kuyusunda rezervuar içerisindeki gözenekliliği artırarak akışkan akışını hızlandırmak ve çamur kalıntılarını bertaraf etmek amacıyla iki aşamalı asitleme işlemi yapılmıştır. İşlem sonunda kuyu yıkanmış ve rezervuardan aniden basınçlı akışkan gelişi ile karşılaşmıştır. Kuyu başı vanasını yerleştirmek amacıyla bu akışkanın kontrol altına alınması hedeflenmiştir. Bunun için önce BOP vanası kapatılarak kuyu başındaki manometreden basınç değeri okunmuştur. Bu değer;

$$P_{manometre} = 3 \text{ atm.'dir.}$$

Kuyuya basılan hali hazırdaki çamur ağırlığı çamur tanklarından ölçülmüş ve bu değer;

$$\rho_{ilk} = 1.08 \text{ t/m}^3 \text{ tür.}$$

Kuyu testleri neticesinde 600 m.-1296 m.ler arası rezervuar olarak belirlenmiştir. 600 m.’de 1.08 t/m<sup>3</sup> ağırlığında çamur sütununun oluşturduğu basınç;

$$P_{kuyuhidrolik} = 0.1 \times \rho_{ilk} \times h \quad (1)$$

$$P_{kuyuhidrolik} = 0.1 \times 1.08 \text{ t/m}^3 \times 600 \text{ m.'dir.}$$

$$P_{kuyuhidrolik} = 64.8 \text{ atm.}$$

Akışkan bu basıncı yeniyor ayrıca kuyu başında 3 atm. bir basınçla geliş yapıyor. Bu durumda kuyudaki akışkan basıncı;

$$P_{kuyu} = P_{kuyuhidrolik} + P_{manometre} \quad (2)$$

$$P_{kuyu} = 64.80 \text{ atm} + 3 \text{ atm.}$$

$$P_{kuyu} = 67.80 \text{ atm. olarak bulunmuştur.}$$

Rezervuar basıncı 67.80 atm’dır. Emniyet katsayısı ilave edilerek hesaplanan yeni basınç;

$$P_{sonkuyu} = P_{kuyu} \times 1.20 \quad (3)$$

$$P_{sonkuyu} = 67.8 \times 1.20$$

$$P_{sonkuyu} = 81.36 \text{ atm'dir.}$$

600 m. derinlikten bu basınca sahip bir akışkanın gelişini önleyecek çamur ağırlığı;

$$\rho_{son} = P_{sonkuyu} / 0.1 \times h \quad (4)$$

$$\rho_{son} = 81.36 / 0.1 \times 600$$

$$\rho_{son} = 1,36 \text{ t/m}^3 \text{ tür.}$$

1 m<sup>3</sup> 1.08 t/m<sup>3</sup> olan bir çamuru 1.36 t/m<sup>3</sup> olacak şekilde ağırlaştırmak için gerekli CaCO<sub>3</sub> miktarı;

$$m_{kalsit} = ((\rho_{ağır} - \rho_{ilk}) / (\rho_{kalsit} - \rho_{ağır})) \times m_{kalsit} \quad (5)$$

$$m_{kalsit} = ((1.36 - 1.08) / (2.71 - 1.36)) \times 2.71$$

$$m_{kalsit} = 0.562 \text{ ton/ } 1 \text{ m}^3 \text{ çamur'dur.}$$

600 m. derinlikte kuyu için ağırlaştırılacak çamur gereksinimi

Kuyunun ilk 245 m.’si 13<sup>3/8</sup> inch muhafaza borusu ile, (245-600) m.ler arası 9<sup>5/8</sup> inch muhafaza borusu ile teçhiz edilmiştir.

245 m 13<sup>3/8</sup> kuyu hacmi;

$$V_{ilk} = 13.375 \times 13.375 \times 0.5068 \times 245 \text{ m.} \quad (6)$$

$$V_{ilk} = 22212.13 \text{ l.'dir.}$$

355 m. 9<sup>5/8</sup> kuyu hacmi;

$$V_{son} = 9.625 \times 9.625 \times 0.5068 \times 355 \text{ m.} \quad (7)$$

$$V_{son} = 16667.35 \text{ l.'dir.}$$

Pompa hattı ve çamur tankında kalacak çamur miktarı 6 m<sup>3</sup>. Bu durumda kuyuya basmak için gerekli toplam çamur miktarı;

$$V_{son} = 22.21 + 16.67 + 6 \quad (8)$$

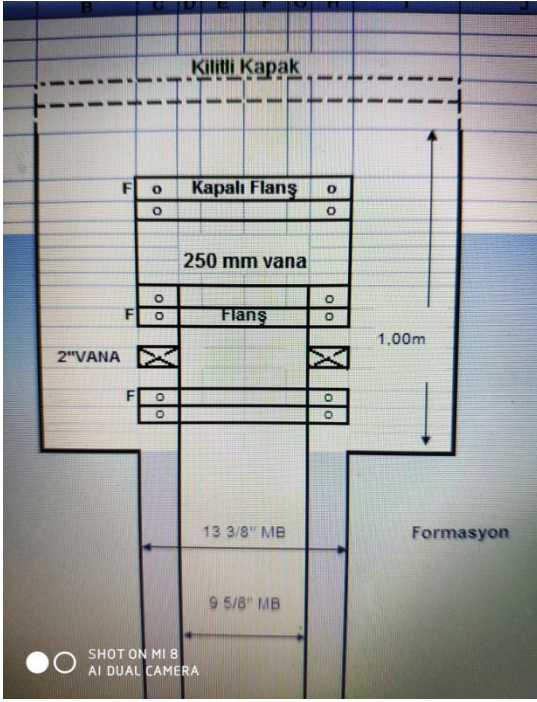
$$V_{top} = 45 \text{ m}^3 \text{ çamur olarak hesaplanır.}$$

Kontrolsüz püskürme; rezervuarda bulunan akışkanın, sondajda kullanılan çamurun kuyu içerisinde oluşturduğu hidrolik basıncı yenmesiyle meydana gelir. Bundan dolayı bu çamurun ağırlığı artırılarak çamurun kuyu içerisinde oluşturduğu basınç değeri yükseltilir. Böylelikle yeni çamurun oluşturduğu basınç rezervuardaki akışkan basıncını yenerek kuyunun kontrol altına alınmasını sağlar. Bunun için de barit (BaSO<sub>4</sub>) kalsit (CaCO<sub>3</sub>) gibi kimyasalların katkısı ile sondaj çamuru ağırlaştırılır. Bu kuyuda CaCO<sub>3</sub> kullanılmıştır ve bu miktar;

$$m_{kalsit} = 0.56 \text{ t/ m}^3 \times 45 \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$m_{kalsit} = 25.21 \text{ t. olarak hesaplanmıştır.}$$

Veriler ışığında hazırlanan ağır çamur kuyuya basılarak kontrolsüz püskürme durdurulmuştur. Bu aşamadan sonra sondaja devam edilerek proje amacına uygun biçimde sonlandırılmıştır. Sondaj bitişinde kuyu başı donanımı Şekil 4.’te verilmiştir.



Şekil 4. ASY-2013/7 Kuyu başı donanımı.

## Sonuçlar

Yenilenebilir, çevre ile uyumlu ve alternatif bir kaynak olması açısından önümüzdeki yıllarda dünya ölçeğinde jeotermal enerjiye olan ilgi artarak devam edecektir.

Türkiye, sahip olduğu 31000 MWt potansiyeli ile jeotermal kaynaklar açısından dünyanın önemli ülkelerinden birisi konumundadır.

Bir jeotermal akışkana ulaşmak için genel olarak sondaj çalışmasına gereksinim duyulur. Bu çalışmalar jeolojik ve jeofizik çalışmalar da dikkate alınırsa araştırmacılara oldukça büyük maliyetler yüklemektedir. Günümüzde bu tip bir çalışmanın maliyeti milyon liralara ile ifade edilebilmektedir. Bundan dolayı sondaj çalışmalarında hedefe ulaşmak için ciddi bir fizibilite çalışması, planlama ve ön hazırlık yapılmalıdır.

Kapalı bir sistemde basınç altında bulunan bir akışkana ulaşıldığında kuyuda ani gaz ya da akışkan gelişi ile karşılaşılabilir. Bu duruma karşı zamanında önlem alınmadığı takdirde kuyunun elden çıkması gibi büyük bir maddi kaybın yanı sıra ciddi bir iş kazası ve buna bağlı

iş gücü kayıpları oluşabilir. Bu anlamda bir jeotermal sondaj çalışmasının en önemli hedeflerinden birisi de emniyetli bir çalışma ortamının yaratılmasıdır. Bunun için nitelikli personelin yanı sıra yeterli malzeme, ekipman ve gerekli kuyu başı donanımları temin edilmelidir.

Ülke genelinde jeotermal enerji kaynaklarını ortaya çıkarmak amacıyla uzun yıllardan beri önemli çalışmalar yürütülmektedir. MTA Genel Müdürlüğü de yürütmüş olduğu projelerle bu alandaki çalışmalara öncülük etmektedir.

Bu bağlamda Ankara\_Sincan-Yenikayı bölgesinde 2013 yılında 1296 m. derinlikte kazılan ASY-2013/7 kuyusundan, 51.93 l/sn akış artezyeni ve 59.60 °C sıcaklıkta jeotermal akışkan elde edilmiştir. Sondaj operasyonları esnasında karşılaşılan kontrolsüz püskürme kuyuya basılan 1.36 t/m<sup>3</sup> ağırlığında çamur ile kontrol altına alınmış, sondaj hedefine başarı ile ulaşılmıştır.

## Kaynaklar

- Arslan S., Darıcı M., Karahan Ç., (2014). *Türkiye'nin Jeotermal Enerji Potansiyeli*, Maden Mühendisleri Odası, Seminer, Ankara.
- Bülbül, E., (2014). Yeni Bir Örtülü Jeotermal Sistem: Ankara-Sincan-Yenikayı Jeotermal Sahası Örneği, *67. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETBK) (2019) Bilgi Merkezi, Enerji, Jeotermal, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Jeotermal> , Erişim tarihi: Mayıs.2019.
- Ermiş, İ. U., (2014). *Ankara-Sincan-Yenikayı (ASY-2013/7) Kuyusu Sondaj Raporu*, MTA Genel Müdürlüğü Sondaj Dairesi, Ankara.
- Ermiş, İ. U., (2016). An Economic Analysis of a Geothermal Drilling Operation, *International Conference of Renewable Energy*, Birmingham.
- Toka, B., (2014). *Jeotermal Enerjinin Kaynağı, Arama Yöntemleri ve Kullanım Alanları*, Seminer Notları, MTA Genel Müdürlüğü, Sondaj Başkanlığı, Ankara.

## **Preventing blow out in the Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 geothermal borehole**

### **Extended Abstract**

*Usage of geothermal resources in Turkey increased notable in the recent years. Geothermal energy explorations have been developed since 45 years in Turkey. It has been found 239 geothermal areas in the country. Western Anatolia has got the most important area of geothermal potential in Turkey. Turkey's geothermal resources consist of about %94 are low-middle enthalpy.*

*Geothermal energy could be use widely in heating, electrical power producing, farm planning, health tourism, chemical process etc. Economic application of a geothermal fluid could be determined in its fluid enthalpy by using with Classical Lindal Diagram*

*A borehole operation is necessary to obtain geothermal fluids generally. Such an operation includes big costs. Because of this reason it is important to complete the operation successfully. As a pioneer General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA) has performed a few project to discover the geothermal potential of Turkey since long years. Ankara-Sincan-Yenikayı ASY2013/7 well is one of them. The organization planned an exploration, which is consist of geological prospection, geochemistry, geophysics measurement and drilling operation near the Ankara. After finishing first steps it was decided to drill a well in the Sincan-Yenikayı Village.*

*The operation performed with 6 technical stuff, 6 drilling operators and 12 workers. GD-3000, which is MTA owner, drilling machine had chosen for operation. Capacity of the machine is 1403 meters with 3½" DP. Operation was started in 2013 June and finished 76 days. The well drilled 1.296 meters depth and it is reached artesianal fluid with 51.93 l/s flow and 59.60 °C enthalpy.*

*In this issue it was mentioned about to control blow out in the Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 well and it is calculated some parameters such as reservoir pressure, mud weight and CaCO<sub>3</sub> amount to control blow out in the well.*

*Blow out, which is high pressure liquid or gasses come out in the well immediately while drilling operation, could cause not only work accidents but also time and economical loses seriously.*

*In the ASY-2013/7 well it was occurred blow out after acids operations. Acids operation was planned for increasing porosity the reservoir and to clean the well end of the borehole. HCl was injected to the well. The well was opened the production after the injection. Because of high artesian, blow out was occurred in the well and controlled with well-head equipment. Well system was closed to the atmosphere-opened system by using BOP. Manometer pressure was read. Hydraulic pressure was calculated at the 600 meters depth. Reservoir pressure was determined with these calculations with engineering safety constant. Weight mud, which will be injected in the well, was prepared after calculating reservoir pressure to take under control pressure the artesian. The operation was finished successfully and blow out was controlled.*

*In this issue it was mentioned about to control blowout in the Ankara-Sincan-Yenikayı ASY-2013/7 well and it is calculated some parameters such as reservoir pressure, mud weight and CaCO<sub>3</sub> amount to control blow out. Reservoir pressure was calculated 81.36 atm. It was prepared 45 m<sup>3</sup> heavy mud, with 1.36 t/m<sup>3</sup> weight, by using 25.21 t. CaCO<sub>3</sub>. This mud was injected in the well and blow out was taken under control.*

**Keywords:** *blow out, geothermal energy, drilling.*



# Betonarme Yapılarda Farklı Kat Sayıları için Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi

**Tuba DEMİR\***

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ,  
[t.demir@firat.edu.tr](mailto:t.demir@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-2092-1029, Tel: (424) 237 00 00 (4262)

**Erkut SAYIN**

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
[esayin@firat.edu.tr](mailto:esayin@firat.edu.tr) ORCID: 0000-0003-0266-759X

Geliş: 19.07.2018, Revizyon: 20.11.2018, Kabul Tarihi: 13.02.2019

## Öz

*Bu çalışmada, dolgu duvarların betonarme binalara olan katkısı değerlendirilmiştir. Bu amaçla 3, 5 ve 7 katlı betonarme binalar modellenmiştir. Bu modeller kendi içinde üç farklı şekilde yeniden tasarlanmıştır. Birinci model tüm katlarının, tamamen dolgu duvarsız olduğu çerçeve modelidir. İkinci model ilk katında dolgu duvarların olmadığı, diğer katlarında ise dolgu duvarların olduğu çerçeve modelidir. Üçüncü model ise tüm katlarında dolgu duvarların olduğu modeldir. Dolgu duvarlı olarak tasarlanan modellerdeki duvarlar, eşdeğer basınç çubuğu şeklinde modellenmiştir. Tüm modeller için doğrusal elastik hesap yöntemi kullanılarak analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda yapıların görelî kat ötelemeleri, yer değiştirme değerleri belirlenmiş ve tüm modeller için ayrı ayrı kıyaslama yapılarak grafikler çizilmiştir. Ayrıca bu modellerinin etki/kapasite oranları belirlenmiş ve hasar bölgeleri tespit edilmiştir. Dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız yapılarda kat sayısı değişiminin, yapıya olan etkisi belirlenmiştir. Kat sayısının artmasıyla yer değiştirme ve görelî kat öteleme değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre dolgu duvarların sistemin rijitliğine ve dayanımına olumlu katkı sağladığı görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme binalar; dolgu duvarlar; eşdeğer basınç çubuğu

\*Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

Yapı sistemlerinin iç kısımlarının kullanım şeklini belirlemek için düşey düzlemde çeşitli şekillerde dolgu duvarlar kullanılmaktadır. Betonarme yapıların iç kısımlarında ve dış bölümlerinde kullanılan dolgu duvarlar, yapının dış ortamla bağlantısını kesen yapı elemanları olup, farklı mekânların da oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Ülkemizde yapılan projelerde çoğunlukla dolgu duvarların yapı davranışına olan etkisi göz ardı edilir. Dolgu duvarların bu etkisinin ihmal edilmesinin nedeni; bu duvarların katkısını analiz eden ve çözümleyen modellerin oluşturulmasının karmaşık ve zor olması, öte yandan bu elemanların, yapının enerji yutma kapasitesine ve dayanımına olan katkısının bilinmesine rağmen, çözümleme için emniyetli tarafta kalınmak istenmesidir.

Yapı sistemlerinin deprem anındaki davranışlarını incelemek ve bu davranışlara karşı alınacak önlemler hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Dolgu duvar ile ilgili yapılan bu çalışmalara ilk katkı, 1956'da Polyakov tarafından ortaya koyulmuştur. Sonraki dönemlerde ise Mallick ve diğerleri (1967) dolgu duvarlı çerçevelerin yatay rijitliğini belirlemek amacıyla sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle, yapmış oldukları deneysel ve analitik çalışmalar arasında iyi bir uyum elde etmişlerdir. Ersoy ve diğerleri (1971) dolgu duvara sahip çerçevelerin davranışını ve dayanımını incelemek amacıyla, farklı yükler altında dokuz adet betonarme dolgu çerçeveyi modellemişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde bu çerçevelerin yapının yük taşıma kapasitesine ve rijitliğine olan etkisini araştırmışlardır. Ayrıca çerçeve açıklığının çerçeve yüksekliğine oranı, dolgu kalınlığı, dolgu ile çerçeve arasında aderansın mevcut olup olmaması, çerçeveye etkileyen yatay yükün düşey yüke oranı gibi değişkenleri de incelemişlerdir. Dhanasekar ve Page (1986) çalışmalarında tuğla dolgu duvar özelliklerinin dolgu duvarlı çerçeve davranışına etkilerini sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemişlerdir. Modelde dolgu duvarın lineer

olmayan deformasyon özelliklerinin ve harç bağlantılarının dolgu duvar davranışına etkilerini göz önüne almışlardır. Dolgu duvarlı çerçevenin deneysel davranışının sonlu elemanlar modeli ile başarılı olarak temsil edilebildiğini tespit etmişlerdir. Govindan ve diğerleri (1986) yedi katlı dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız çerçeve modelleyip, bu iki yapı sisteminin davranışlarını karşılaştırmışlardır. Saneijad ve diğerleri (1995) çalışmalarında yatay yüklere maruz kalan yapılarda, dolgu duvarların gerçek dayanım ve rijitliğe etkisinin önemli olduğunu belirtmişlerdir. Negro ve diğerleri (1997) dolgu duvarın yapı sistemine olan etkisini belirlemek için dört katlı bir yapı modelleyip, bu model üzerinde çeşitli testler yapmışlardır. Bu yapıyı dolgu duvarsız çerçeve, dolgu duvarlı çerçeve ve ilk kat yüksekliği arttırılmış olan model şeklinde tasarlayıp, her bir modele testler uygulamıştır. Dolgu duvarın varlığı ve dağılım düzeni, yapının davranışını ve yer değiştirmesini farklı etkilemiştir.

İrtem ve diğerleri (2004), betonarme binaların performansına dolgu duvarın katkısını belirlemek için çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bunun için DBYYHY 2007 (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik)'ye uygun bina tasarlayıp, bu yapıyı dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız modelleyerek analizler yapmışlardır. Dolgu duvarı fiktif çubuklarla tanımlamışlardır. Ayrıca, dolgu duvarların basınç kırılması davranışı gösterdiğini kabul ederek, yapı sistemini iki ucu mafsalı çubuk elemanlarla temsil etmişlerdir. Korkmaz ve diğerleri (2006), çerçeve ve dolgu duvarların bulunduğu betonarme yapıların deprem davranışındaki değişikliklerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında 10 katlı dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız bir çerçeve yapı sisteminin olduğu ve dolgu duvarların yapının tüm katlarında bulunduğu modellerin, analizlerini yaparak, deprem davranışına olan etkilerini incelemişlerdir. Sivri ve diğerleri (2006) deprem etkisi altındaki dolgu duvarların, yapı davranışına olan katkısını belirlemek için eşdeğer diyagonal eleman kullanmışlardır. Yapmış oldukları analizlerde Düzce ve Erzincan deprem kayıtlarını yer hareketi olarak dikkate almışlardır. Dolgu duvarların, yapının dinamik

davranışını etkilediğini göstermişlerdir. Celep ve diğerleri (2009), beş katlı yapı modelleyerek, taşıyıcı sistemde dolgu duvarların, binanın yatay yük davranışına olan etkisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda, dolgu duvarların kat kesme kuvvetinin büyük bir kısmını karşıladığını gözlemlemişlerdir.

Taşlıgedik ve diğerleri (2011), dolgu duvarların betonarme binaların deprem performansı üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, taşıyıcı sistemde göz ardı edilen dolgu duvarların önemli etkilere neden olduğunu vurgulamışlardır. Tekeli ve diğerleri (2015) yapmış oldukları çalışmalarında bina açıklık sayısı 5, kat adetleri 3 ve 5 olan modeller tasarlamışlardır. Bu binaları önce dolgu duvarsız olarak incelemişlerdir. Daha sonra oluşturdukları bu modelleri kullanarak, dolgu duvarları bu yapının farklı yerlerine yerleştirmişlerdir ve dolgu duvar yerleşiminin ve miktarının, binanın davranışına olan etkisini değerlendirmişlerdir.

## Amaç ve Kapsam

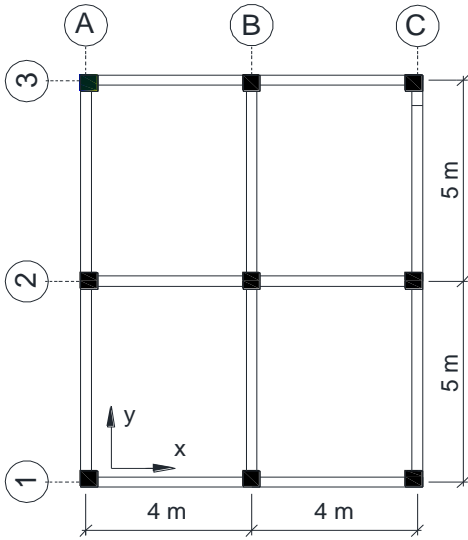
Dolgu duvarların bina davranışına olan etkisi kabul görse de, deprem yönetmelikleri bu durumu hesaplamalarda ihmal edip, genellikle duvarların yerleşimi ile ilgili kısıtlamalar getirmektedir. Bu çalışmada, dolgu duvarların betonarme çerçeve davranışını, hangi açılardan etkilediğini saptamak amacıyla, dolgu duvarsız çerçeve, ilk katı dolgu duvarsız çerçeve ve dolgu duvarlı çerçeveden oluşan üç farklı yapı sistemi modellenmiştir. Öncelikle, yapının kolon ve kiriş elemanlarına ait donatılar hesaplanıp, bulunan değerler manuel olarak programa girilmiştir. Daha sonra kat sayıları üç, beş ve yedi katlı olacak şekilde düzenleme yapılmıştır. Modellenen yapılarda, performans değerlendirilmesi yapmak için kat sayıları farklı olan her model için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Ayrıca duvarların katlardaki bulunma durumlarına ve yerine göre yeniden analizler yapılarak, bu dolgu duvarların yapıya olan katkısı araştırılmıştır. Bununla birlikte dolgu duvarların olumsuz etkisi olan yumuşak kat etkisi de belirlenmiştir.

Dolgu duvarların yapı taşıyıcı sisteme dahil edilmesinde eşdeğer basınç çubuğu ile modellenmesi üzerinde yapılan çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada dolgu duvarlar, Mainstone ve Stafford-Smith tarafından önerilen yaklaşımlar dikkate alınarak, eşdeğer basınç çubuğu şeklinde tanımlanmıştır. Bu modelleme yaklaşımında, betonarme çerçeve içindeki dolgu duvarların, kat hizalarına tesir eden yatay kuvvetler altında, kuvvetin tesir ettiği düğüm noktası ile diyagonaldeki düğüm noktası arasında bir basınç çubuğu gibi davrandığı varsayılmaktadır. Daha önce yapılmış deneyler ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerçekleştirilen teorik çalışmalarda, yük aktarımının, eşdeğer basınç çubuğu ile yeterli bir şekilde temsil edilebildiği gözlemlenmiştir. Çerçeve modellerinin etki/kapasite oranları belirlenmiş ve yönetmelikteki sınır değerler dikkate alınarak, bulunan bu değerlere karşılık gelen hasar bölgeleri tespit edilmiştir. Daha sonra bu üç yapı modeli üzerinde doğrusal elastik hesap yöntemiyle analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu değerlendirmeler sonucunda, dolgu duvarların, yapıdaki mevcut durumuna göre yer değiştirme, görelî kat ötelemesi gibi özelliklerinin farklı değerler aldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kat sayısının artmasının da yapıya olan etkisi gösterilmiştir.

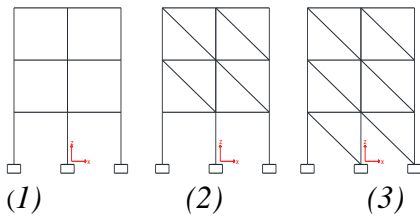
## Binaların Modellenmesi

Performans değerlendirmesi yapmak amacıyla, üç, beş ve yedi katlı betonarme çerçeve binalar Şekil 1'de gösterildiği gibi modellenmiştir. Modellenen binaların kat yükseklikleri 3 m açıklıkları ise x yönünde 4 m, y yönünde ise 5 m olarak dikkate alınmıştır.

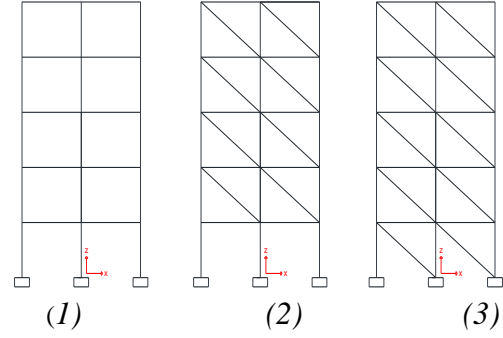


Şekil 1. Kat planı

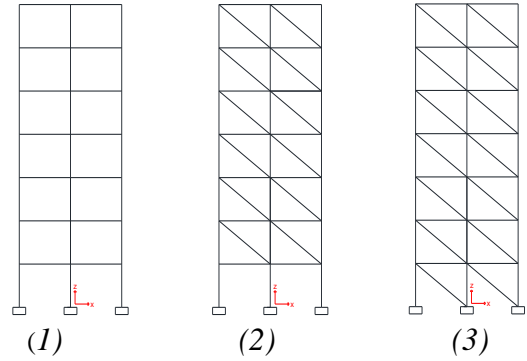
Modellemede binalar üç farklı şekilde düzenlenmiştir. Birinci tip model, dolgu duvarsız çerçeveden oluşan yapı sistemidir. İkinci tip model, ilk katı dolgu duvarsız, diğer katları dolgu duvarlı olarak modellenmiştir. Üçüncü tip model, ise tüm katlarında dolgu duvarların olduğu yapı sistemidir. Bu bina modelleri Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir. Binalar, SAP2000 sonlu eleman programı ile modellenmiştir. Çalışmada, betonarme düzlem çerçeve binaların beton sınıfı C25, çelik sınıfı ise S420 olarak seçilmiştir. Modellenen binaların 2.° deprem bölgesinde ( $A_0 = 0.30$ ), bina önem katsayısının  $I = 1$  ve Z2 zemin sınıfında ( $T_A = 0.15$  sn ve  $T_B = 0.40$  sn) olduğu kabul edilmiştir. Taşıyıcı sistem davranış katsayısı R ise 8 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 2. Üç katlı betonarme çerçeve modelleri

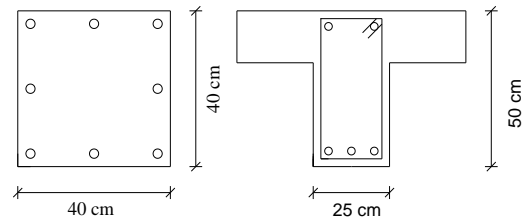


Şekil 3. Beş katlı betonarme çerçeve modelleri



Şekil 4. Yedi katlı betonarme çerçeve modelleri

Kolon boyutları 40x40 cm, kiriş boyutları ise 25x50 cm dir (Şekil 5). Ayrıca kolonların boyutlandırılmasında etriye aralıkları değeri, yönetmelikteki esaslar dikkate alınarak, kolon orta bölgesi ve sarılma bölgesi için ayrı ayrı hesaplanıp, programa girilmiştir.



Şekil 5. Kolon ve kiriş kesitleri

Modellenen tüm yapılar için doğrusal elastik hesap yöntemiyle analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarından alınan değerler doğrultusunda kolon ve kirişlerin çatlamış kesite ait eğilme rijitlikleri, moment kapasiteleri hesaplanmış ve bu moment kapasite değerleri kullanılarak etki/kapasite(r) oranları belirlenmiştir. DBYYHY'deki (2007), etki/kapasite oranları sınır değerleri dikkate alınarak, dolgu duvarlı ve

dolgu duvarsız modellerin hasar sınırları karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2’de üç katlı modele ait hasar sınırları karşılaştırılması verilmiştir.

**Tablo 1.** Kolonlar için hasar bölgelerinin karşılaştırılması

Kolonlar	Dolgu Duvarsız Çerçeveye ait Hasar Sınırı		Dolgu Duvarlı Çerçeveye ait Hasar Sınırı	
	r	Hasar sınırı	r	Hasar sınırı
SA11	2.25	MN	3.104	GV
SB11	2.75	MN	1.645	MN
SC11	2.25	MN	3.268	GV
SA21	2.08	MN	2.671	MN
SB21	2.37	MN	1.371	MN
SC21	2.08	MN	2.813	MN
SA31	2.05	MN	2.542	MN
SB31	2.75	MN	1.645	MN
SC31	2.25	MN	3.268	GV

Kolonlar için hasar bölgelerinin karşılaştırılmasında, dolgu duvarsız çerçeve modelinde kolonların % 77.8’i minimum hasar bölgesinde, % 7.4’ü belirgin hasar bölgesinde,

SA12	1.25	MN	5.884	GV
SB12	2.41	MN	1.264	MN
SC12	1.25	MN	4.396	MN
SA22	1.21	MN	5.349	GV
SB22	2.18	MN	0.748	MN
SC22	1.21	MN	4.325	GV
SA32	1.25	MN	5.884	GV
SB32	2.41	MN	1.264	MN
SC32	1.25	MN	4.396	GV
SA13	10.17	GÇ	0.467	MN
SB13	1.45	MN	0.928	MN
SC13	10.17	GÇ	0.538	MN
SA23	6.99	GV	0.427	MN
SB23	1.18	MN	0.851	MN
SC23	6.99	GV	0.525	MN
SA33	10.17	GÇ	0.467	MN
SB33	1.45	MN	0.928	MN
SC33	10.17	GÇ	0.538	MN

%14.8’i ileri hasar bölgesinde kalmıştır. Dolgu duvarlı modelde ise kolonların % 77.8’i minimum hasar bölgesi, % 22.2’si belirgin hasar bölgesinde kalmıştır

**Tablo 2.** Kirişler için hasar bölgelerinin karşılaştırılması

Kirişler	Dolgu Duvarsız Çerçeveye ait Hasar sınırı		Dolgu Duvarlı Çerçeveye ait Hasar sınırı	
	r	Hasar sınırı	r	Hasar sınırı
KX11 sol uç	6.563	GÇ	1.807	MN
KX11 sağ uç	2.180	MN	2.462	MN
KX12 sol uç	5.279	GÇ	0.722	MN
KX12 sağ uç	1.835	MN	1.006	MN
KX13 sol uç	2.578	MN	0.389	MN
KX13 sağ uç	0.823	MN	0.513	MN
KX21 sol uç	7.392	GÇ	1.826	MN
KX21 sağ uç	2.089	MN	2.464	MN
KX22 sol uç	5.958	GÇ	0.777	MN
KX22 sağ uç	1.757	MN	0.99	MN
KX23 sol uç	2.883	MN	0.363	MN
KX23 sağ uç	0.79	MN	0.642	MN
KX31 sol uç	6.563	GÇ	1.807	MN

KX31 sağ uç	2.180	MN	2.462	MN
KX32 sol uç	5.279	GÇ	0.722	MN
KX32 sağ uç	1.836	MN	1.006	MN
KX33 sol uç	2.578	MN	0.389	MN
KX33 sağ uç	0.823	MN	0.513	MN

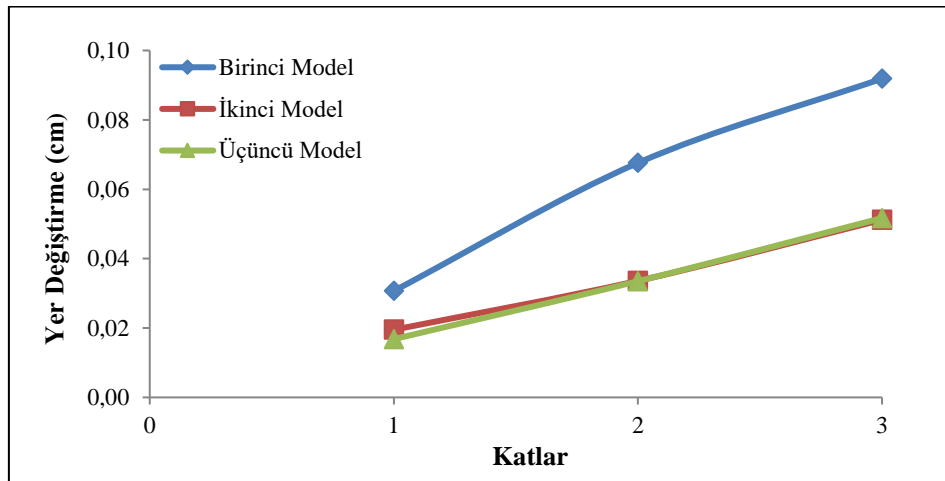
Kirişler için hasar bölgelerinin karşılaştırılmasında, her iki modelin hasar sınırlarında farklılıklar görülmüştür. Dolgu duvarlı çerçeve modelinde kirişlerin % 66.7'si minimum hasar bölgesinde, % 33.3'ü belirgin hasar bölgesinde kalmıştır. Dolgu duvarlı modelde ise kirişlerin tamamı minimum hasar bölgesinde kalmıştır.

### Bina Modellerinin Yer Değiştirme Değerlerinin Karşılaştırılması

Üç katlı dolgu duvarlı, ilk katı dolgu duvarlı ve dolgu duvarlı çerçevelere ait yer değiştirme değerleri Tablo 3'de, bu değerlerin grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 6'da verilmiştir.

**Tablo 3.** Üç katlı betonarme çerçeve modellerine ait yer değiştirme değerleri

Katlar	Birinci model (cm)	İkinci model (cm)	Üçüncü model (cm)
1.kat	0.031	0.020	0.017
2.kat	0.068	0.034	0.034
3.kat	0.092	0.051	0.052



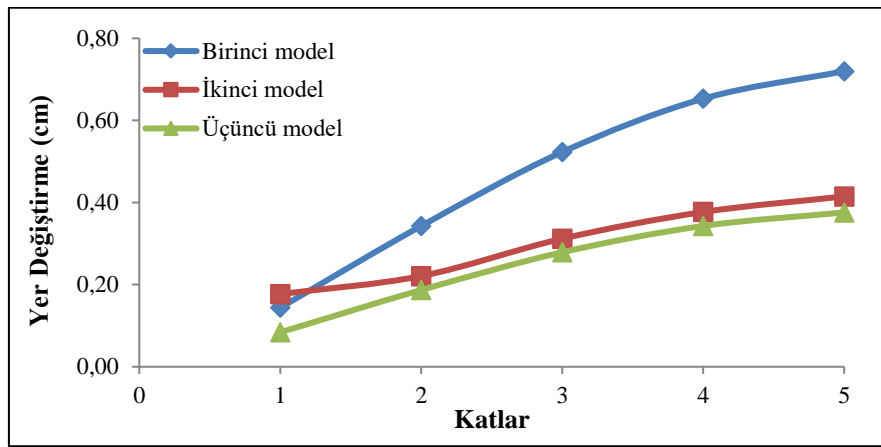
**Şekil 6.** Üç katlı betonarme çerçeve modellerinin yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Beş katlı dolgu duvarlı, ilk katı dolgu duvarlı ve dolgu duvarlı çerçevelere ait yer değiştirme

değerleri Tablo 4'de, bu değerlerin grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 7'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Beş katlı betonarme çerçeve modellerine ait yer değiştirme değerleri

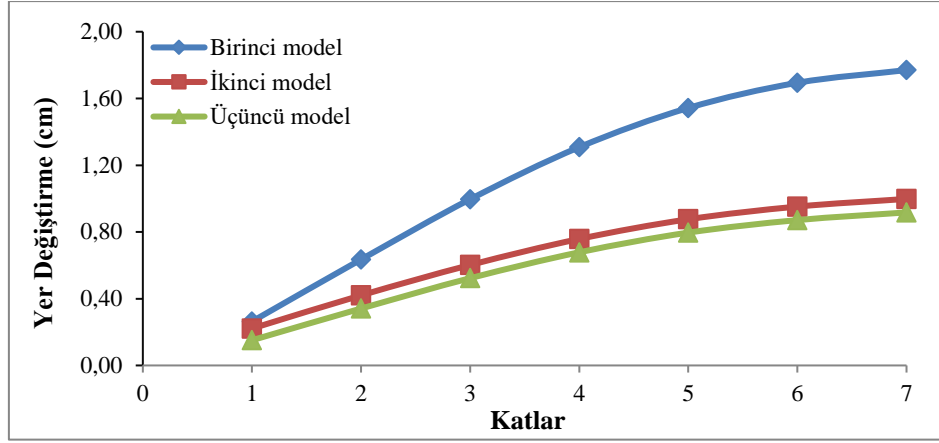
Katlar	Birinci model (cm)	İkinci model (cm)	Üçüncü model (cm)
1.kat	0.144	0.177	0.084
2.kat	0.343	0.221	0.187
3.kat	0.523	0.312	0.279
4.kat	0.653	0.377	0.343
5.kat	0.720	0.415	0.376

**Şekil 7.** Beş katlı betonarme çerçeve modellerinin yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

Yedi katlı dolgu duvarsız, ilk katı dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı çerçevelere ait yer değiştirme değerleri Tablo 5’de, bu değerlerin grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 8’de verilmiştir.

**Tablo 5.** Yedi katlı betonarme çerçeve modellerine ait yer değiştirme değerleri

Katlar	Birinci model (cm)	İkinci model (cm)	Üçüncü model (cm)
1.kat	0.263	0.221	0.151
2.kat	0.635	0.420	0.341
3.kat	0.996	0.602	0.523
4.kat	1.308	0.758	0.678
5.kat	1.543	0.876	0.796
6.kat	1.694	0.952	0.871
7.kat	1.770	0.998	0.917



Şekil 8. Yedi katlı betonarme çerçeve modellerinin yer değiştirme değerlerinin karşılaştırılması

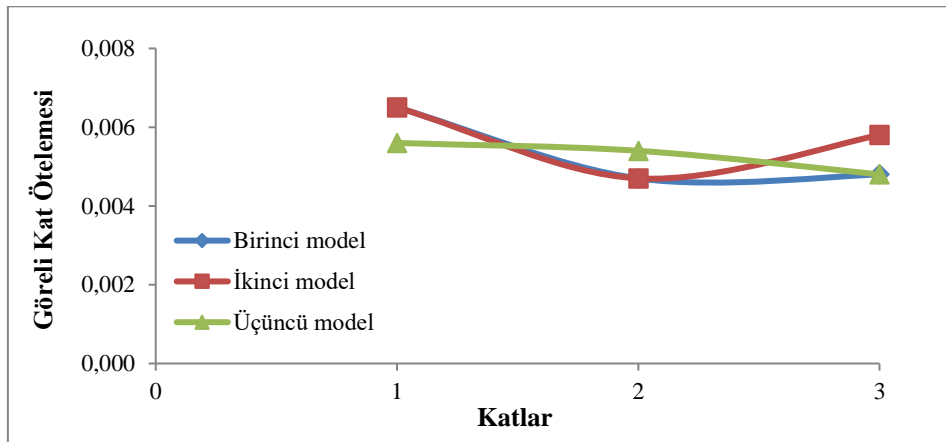
Yer değiştirme ile ilgili yukarıda yapılan analizler sonucunda, dolgu duvarlı çerçevedeki yer değiştirme değeri, dolgu duvarsız çerçeveye göre daha az olmuştur. İlk katı dolgu duvarsız olan modelin yer değiştirme değeri ise dolgu duvarlı modelin yer değiştirme değerinden daha büyük değerde elde edilmiştir.

### Bina Modellerinin Görelî Kat Öteleme Oranlarının Karşılaştırılması

Üç katlı, beş katlı ve yedi katlı dolgu duvarlı, dolgu duvarsız ve ilk katı dolgu duvarsız çerçevelere ait görelî kat öteleme oranları Tablo 6, Tablo 7, Tablo 8’de, bu değerlerin grafiksel karşılaştırılması ise Şekil 9, Şekil 10, Şekil 11’de verilmiştir.

Tablo 6. Üç katlı betonarme çerçeve modellerine ait görelî kat öteleme oranları

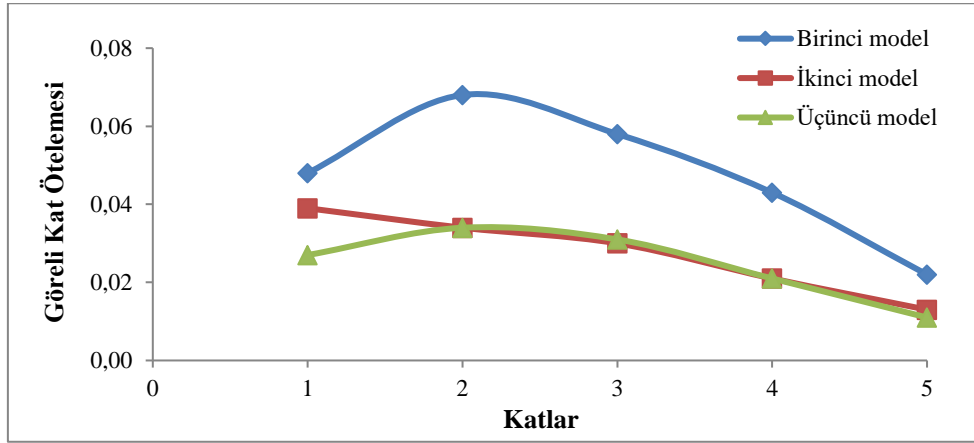
Katlar	1	2	3
Birinci model	0.0065	0.0047	0.0048
İkinci model	0.0065	0.0047	0.0058
Üçüncü model	0.0056	0.0054	0.0048



Şekil 9. Üç katlı betonarme çerçeve modellerinin görelî kat ötelemesi oranlarının karşılaştırılması

Tablo 7. Beş katlı betonarme çerçeve modellerine ait görelî kat ötelemesi oranları

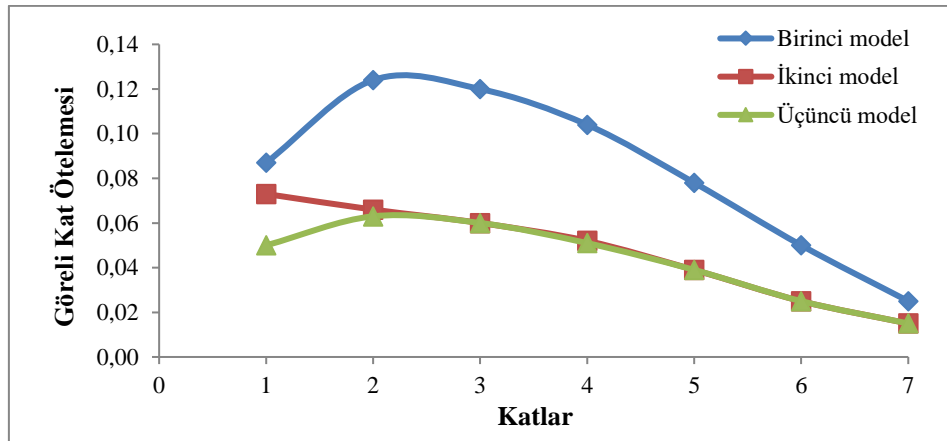
Katlar	1	2	3	4	5
Birinci model	0.048	0.068	0.058	0.043	0.022
İkinci model	0.039	0.034	0.030	0.021	0.013
Üçüncü model	0.027	0.034	0.031	0.021	0.011



Şekil 10. Beş katlı betonarme çerçeve modellerinin görelî kat ötelemesi oranlarının karşılaştırılması

Tablo 8. Yedi katlı betonarme çerçeve modellerine ait görelî kat ötelemesi oranları

Katlar	1	2	3	4	5	6	7
Birinci model	0.087	0.124	0.120	0.104	0.078	0.050	0.025
İkinci model	0.073	0.066	0.060	0.052	0.039	0.025	0.015
Üçüncü model	0.050	0.063	0.060	0.051	0.039	0.025	0.015





*Şekil 11. Yedi katlı betonarme çerçeve modellerinin görelî kat ötelemesi oranlarının karşılaştırılması*

Görelî kat ötelemeleri karşılaştırıldığında en büyük değeri dolgu duvarsız modellerde meydana geldiği bu değeri ilk katı dolgu

duvarsız modelin ve dolgu duvarlı modelin izlediği görülmüştür.

### **Sonuçlar ve Tartışma**

Bu çalışmada, farklı kat sayısına sahip betonarme yapılarda dolgu duvarların, yapının rijitliğine olan katkısı araştırılmıştır. Dolgu duvarlar eşdeğer basınç çubuğu yöntemi ile modellenmiştir. Farklı kat sayısına sahip tüm katları dolgu duvarlardan oluşan, ilk katı dolgu duvarsız diğer katları dolgu duvarlı olan ve tüm yapının tamamen dolgu duvarsız olduğu modeller hazırlanmıştır. Bu modeller üzerinde yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

- Dolgu duvarlı çerçevedeki yer değiştirme değeri, dolgu duvarsız çerçeveye göre daha az olmuştur.
- İlk katı dolgu duvarsız olan modelin yer değiştirme değeri ise dolgu duvarlı modelin yer değiştirme değerinden daha büyük değerde, dolgu duvarsız modelin yer değiştirme değerinden ise daha küçük değerde elde edilmiştir.
- Dolgu duvarlı çerçeve daha rijit davranış göstermiştir.
- Analizleri yapılan tüm modellerin görelî kat öteleme değerleri de karşılaştırılmıştır. En büyük kat öteleme değeri dolgu duvarsız çerçeve modelinde görülmüştür. Bu modeli sırasıyla ilk katı dolgu duvarsız çerçeve modeli ve dolgu duvarlı çerçeve modeli takip etmiştir.
- Birinci katın öteleme değerleri kıyaslandığında, ilk katı dolgu duvarsız çerçeve modelinin kat öteleme değeri, dolgu duvarlı çerçeve modelinin kat öteleme değerinden daha büyük çıkmıştır. Dolgu duvarsız çerçeve modelinin öteleme değeri ise ilk katı dolgu duvarsız modelin kat ötelemesi değerinden daha fazla olmuştur.
- Dolgu duvarların sisteme katılmasıyla, yapı sisteminde daha az yer değiştirme olduğu gözlenmiştir.

- Kolonlar için yapılan hasar bölgelerinin karşılaştırılmasında, dolgu duvarsız ve dolgu duvarlı çerçeve modellerinde kolonların % 77.8'i minimum hasar bölgesinde kalmıştır. Diğer hasar bölgelerini karşılaştırdığımızda, dolgu duvarsız modelde kolonların % 7.4'ü belirgin hasar bölgesinde, %14.8'i ise ileri hasar bölgesinde kalırken, dolgu duvarlı modelde ise kolonların % 22.2'si belirgin hasar bölgesinde kalmıştır.
- Kirişler için yapılan hasar bölgelerinin karşılaştırılmasında dolgu duvarsız çerçeve modelinde kirişlerin % 66.7'si minimum hasar bölgesinde, % 33.3'ü ise belirgin hasar bölgesinde kalmıştır. Dolgu duvarlı modelde ise kirişlerin tamamı minimum hasar bölgesinde kalmıştır.

Elde edilen analizler sonucunda dolgu duvarların, yapı parametrelerinde meydana getirdiği değişiklikler elde edilmiştir. Dolgu duvarların etkisi sistem çözümlemesinde dikkate alınmasa da yapı sisteminin yatay rijitliğini arttırmasından dolayı tercih edilmelidir. Yapı sistemleri projelendirilirken, dolgu duvarlı ve dolgu duvarsız olarak ayrı ayrı hesaplamalar ve analizler yapılmalıdır. Her iki durum için en elverişsiz koşullar altında eleman boyutlandırılması ve donatı seçimi yapılmalıdır.

## Kaynaklar

- Celep, Z., (2009). “Betonarme yapılar”, Beta dağıtım, 5. baskı, İstanbul.
- Celep, Z., (2014). “Betonarme taşıyıcı sistemlerde doğrusal olmayan davranış ve çözümleme”, Beta dağıtım, İstanbul.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., (2004). “Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı”, Beta Dağıtım, İstanbul.
- Chopra, A. K., (2001). Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering, Englewood Cliffs, NJ.
- DBYYHY (2007). “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara”.
- Dhanasekar, M., and Page, A. W., (1986). The Influence of Brick Masonry Infill Properties on the Behavior of Infilled Frames. Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 2, pp. 593-605.
- Ersoy, U., ve Uzsoy, S., (1971). The Behaviour and Strength of Infilled Frames, Report No. MAG-205, TÜBİTAK, Ankara, Turkey.
- Govindan, P., Lakshmiapaty, M., Santhakumar, A. R., (1986). “Ductility of infilled frames”, A.C.I. Journal, pp. 567-576.
- İrtem E., Türker K. ve Haşgül U., (2004). “Türk deprem yönetmeliğinin performans hedeflerinin lineer olmayan statik analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi”, *Bahkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 4 (4), 3-13.
- İlki, A. ve Celep, Z., (2011). Betonarme Yapıların Deprem Güvenliği, ODTÜ, Ankara.
- Korkmaz, A., Uçar T. ve İrtem E., (2006). “Yumuşak kat düzensizliğinin ve dolgu duvarların betonarme binaların deprem davranışına etkileri”, IMO Teknik Kongre, Antalya.
- Mallick, D.V. and Severn, R.T., (1967). The Behaviour of infilled Frames under static loading. Institution of Civil Engineering, Vol 38 pp 639-956.
- Negro, P., Colombo, A., (1997). “Irregularities induced by nonstructural masonry panels in framed buildings”, *Engineering Structures*, 17(7), 576-585.
- Özcebe, G., Yakut, A., Binici, B. ve Demirel, İ.O., (2013). Dolgu Duvarların Deprem Davranışına Etkisi, 2. *Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Hatay.
- Polyakov, S. V., (1956). “Masonry in Framed Buildings; An Investigation into the Strength and Stiffness of Masonry Infilling (English Translation)”, Moscow, 1957.
- Saneinejad, A., and Hobbs, B.,(1995). Inelastic Design of Infilled Frames. *Journal of Structural Engineering* 121: 4, 634-650.
- SAP 2000 v15, “Structural analysis program, Computers and Structures, Berkeley, California”
- Sivri, M., Demir, F. ve Kuyucular, A., (2006). “Dolgu duvarlarının çerçeve yapının deprem davranışına ve göçme mekanizmasına etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (1), 109-115.
- Stafford-Smith, B.,(1962). “Lateral Stiffness of Infilled Frames,” *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 88.
- Taşlıgedik, A.S., Pampanin, S., and Palermo, A. (2011). Damage Mitigation Strategies of ‘Non-Structural’ Infill Walls: Concept and Numerical-Experimental Validation Program. Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society, Aucland, New Zealand, pp.120-127.
- Tekeli, H., Demir, F. ve Akyürek, O., (2015). “Betonarme bina performansına dolgu duvarların etkisi”, 8. *ulusal deprem mühendisliği konferansı* 11-15 Mayıs, İstanbul (s.275-285).
- TS500 (2000), “Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları”, TSE, Ankara.
- Zarnic, R., and Tomasevic, M., (1995). “Modelling of response of masonry infilled frame, 10th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam”.

## **Effect of infill walls on earthquake behavior of reinforced concrete structures with different floors**

### **Extended abstract**

*In this study, it is evaluated the contribution of infill walls to reinforced concrete buildings. For this purpose, three-storey, five-storey and seven-storey reinforced concrete buildings are modeled. These buildings has two spans on both directions; 4 m in the x direction and 5 m in the y direction. C25 concrete class and S420 reinforcing steel class was selected. It is assumed that the buildings are located on second degree earthquake zone. The building importance factor and local site class is considered as  $I = 1.0$  and Z2, respectively. The structural system behavior factor  $R$  was taken as 8.*

*These models are redesigned in three different type in itself. The first model is a bare frame model. The second model is the frame model which is absence of infill walls on the first floor and have infill walls on other floors. The third model is the frame model having infill walls on all floors. Also, the column and beam dimensions were selected as 40x40 cm and 25x50 cm, respectively. The values of the stirrup spacing were calculated separately for the mid zone and the confinement zone of the columns. In the models, the infill walls are designed as equivalent compression strut.*

*Linear analysis method is used for analyses of the models. As a result of the analysis, interstory drifts, displacement values are determined and graphics are drawn for all models according to obtained values.*

*When the analysis results were examined, it was seen that displacement values of the third model was less than the first model. In addition to this, the displacement value of the second model was smaller than the displacement value of the first model, and it was larger than the displacement value of the third model.*

*Also, interstory drift ratios were compared. According to the obtained results, maximum interstory drift ratios were acquired for the first model. The results of the interstory drift ratios of the*

*second and third model are close to each other for three and five-storey buildings.*

*In addition, demand/capacity ratios of these models were calculated and damage zones were determined. And the effect of the change in the number of floors on the structure with infill wall and without infill wall was determined too. With the increase in the number of floors, the displacement and interstory drifts values increased in direct proportion.*

*As a result of this study, the effect of infill walls in reinforced concrete structures were investigated in terms of displacement and interstory drifts. And the analysis results demonstrated that the infill walls reduce the displacement and interstory drifts values. Also, infill walls contributed positively to the rigidity and strength of the models.*

**Keywords:** *reinforced concrete building, infill walls, equivalent compression strut*



# Enerji geri kazanımı için arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonu

**Sibel BAŞAKÇILARDAN KABAKCI\***

Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova  
[sibel.kabakci@yalova.edu.tr](mailto:sibel.kabakci@yalova.edu.tr) ORCID: 0000-0001-9717-5111, Tel: (226) 815 53 75

**Doğancan KOCA**

Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova  
[dogancankoca@yahoo.com](mailto:dogancankoca@yahoo.com) ORCID: 0000-0002-5976-668X

Geliş: 09.08.2018, Revizyon: 31.10.2018, Kabul Tarihi: 15.02.2019

## Öz

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında biyokütle, farklı dönüşüm yöntemleriyle enerji, değerli kimyasallar ve biyoyakıt üretimine imkan veren yegane kaynaktır. Üretilme miktarı, yapısındaki biyolojik olarak parçalanabilen organik fraksiyonun fazlalığı ve kuru bazda sahip olduğu enerji, arıtma çamurunu önemli bir biyokütle kaynağı yapmaktadır. Günümüzde arıtma çamurunun bertarafı bütünlük bir yaklaşımla arıtma sistemlerinin içine dahil edilse de en fazla tercih edilen yöntemler vahşi depolama, yakma ve çimento sanayiinde ek yakıt olarak kullanılmaktadır. Hangi yöntem seçilirse seçilsin arıtma çamurunun içindeki nem oranı (>%85) nihai bertaraf yöntemini zorlaştırmakta ve susuzlandırmayı gerekli kılmaktadır. Yapısında oldukça fazla su bulunduran biyokütlelerin değerlendirilebilmesi için hidrotermal yöntemler iyi bir yaklaşım olabilir. Mevcut çalışma, bir belediyenin arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonunu ve elde edilen hidrokoku yakıt özelliklerini incelemektedir. Ham arıtma çamuru herhangi bir ön işlem uygulanmadan doğrudan hidrotermal işleme alınmıştır. 220°C'de 45, 90 ve 120dk'lık reaksiyon sürelerinde gerçekleştirilen hidrotermal reaksiyonlarda katı madde dönüşümünün reaksiyon süresinden etkilenmediği ve arıtma çamuru içindeki katı maddenin yaklaşık %50'sinin hidrokoka dönüştüğü gözlemlenmiştir. Hidrokokların ısı değerinin, uçucu madde ve sabit karbon içeriğinin karbonizasyon süresinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Reaksiyon süresinin 45dk'dan 120dk'ya çıkarılması ısı değeri yaklaşık %31, uçucu madde içeriğini de %14.5 azaltmıştır. Karbonizasyon süresinin 90dk olmasıyla sabit karbon içeriği %14 ve uçucu madde içeriği %31.2 ve 3043 cal/g ısı değere sahip hidrokok elde edilmiştir. Hidrotermal karbonizasyonun arıtma çamurunu etkin bir şekilde susuzlandığı ve aromatisasyon reaksiyonu sonucu aromatik grupların olduğu FT-IR analizlerinden de görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrotermal karbonizasyon; Arıtma çamurları; Hidrokok; Enerji geri kazanımı

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Artan nüfus, tüketim alışkanlıklarındaki değişiklikler, hızlı kentleşme ve gelişen teknoloji enerji talebini günden güne arttırmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansının 2015 verilerine göre hazırladığı ve 2017'de yayınladığı dünya enerji istatistiklerinde (IEA, 2017) dünya toplam birincil enerji arzında kömürün %28.1, petrolün %31.7 ve doğal gazın %21.6 payı olduğu görülmektedir. Enerji arzının %80'den fazlasının fosil kaynaklar tarafından sağlanması, küresel ısınma gibi önemli bir problemi beraberinde getirmektedir. Yenilenebilir kaynakların enerji üretiminde kullanılması, fosil kaynakların oluşturduğu çevresel etkilerin azalmasına önemli bir katkı yapacaktır. Yenilenebilir kaynaklar içinde farklı dönüşüm yöntemleri kullanarak enerji, yakıt, malzeme ve kimyasal madde üretimine imkân tanıyan yegâne kaynak biyokütledir.

Biyokütle, dünya üzerinde yaşayan ya da yakın zamanda (100 yıllık bir süreçte) yaşamış tüm canlıları ve bunların atıklarını içine alan bir terimdir ve güneş enerjisinin kimyasal enerji olarak depolandığı organik maddeler olarak kabul edilebilir (McKendry, 2002). Bu tanım, tarım (bitkisel ve hayvansal maddeler dahil), ormancılık ve ilgili endüstrilerin biyolojik olarak parçalanabilen ürünlerini, atıklarını ve kalıntılarını, aynı zamanda endüstriyel ve evsel atıkların biyolojik olarak parçalanmış fraksiyonlarını içerir (Saidur vd., 2011).

Fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle arıtma yapan atıksu arıtma tesislerinin bir yan ürünü olan arıtma çamuru, değerli bir biyokütle kaynağıdır. Bunun nedeni, arıtma çamurunun biyolojik olarak parçalanabilen organik madde fraksiyonunun fazla olması, kuru bazda enerji içeriğinin yüksek olması (%5-6 nem içerecek şekilde kurutulduğunda ısı değerinin orijinalinden 10 kat arttığı belirtilmektedir) ve üretim miktarının fazla olmasıdır (Parshetti vd., 2013; Kliopova vd. 2015). Yapı ve içerik olarak arıtma çamurları diğer lignoselülozik biyokütle kaynaklarından farklıdır. Atıksu arıtma çamurundaki organik bileşenlerin büyük bir kısmı karbohidrat, protein ve lipitlerden

oluşmaktadır (He vd., 2013). Arıtma çamuru toprak için besin değeri olan bileşenler (organik madde, azot, fosfor, potasyum ve daha düşük konsantrasyonlarda kalsiyum, kükürt ve magnezyum) içerdiği kadar çevre için potansiyel tehlikeler barındıran ağır metaller, toksinler, virüsler, ilaç kalıntıları, hormonlar ve dioksinler gibi bileşenleri de içerir (Kliopova vd. 2015).

Atıksuların fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma işlemleri gördükten sonra oluşan arıtma çamuru uygulanan işlemlere bağlı olarak farklı oranlarda katı miktarına sahip olup (Fonts vd., 2009), içerdiği yüksek nem ve organik madde nedeniyle depolanması, taşınması ve bertarafı oldukça zordur. Evsel atıksu arıtma tesislerinden çıkan arıtma çamurları farklı amaçlara yönelik işlem görebilir, sahip olduğu enerji geri kazanılabilir ya da uygun yöntemlerle bertaraf edilirler.

Termokimyasal yöntemlerle enerji geri kazanımı söz konusu olduğunda ister yakma ya da birlikte yakma, ister piroliz gibi ileri süreçler olsun, arıtma çamurlarının mutlak suretle kurutulması neminin uzaklaştırılması ve sonrasında termokimyasal işleme alınması gerekmektedir (Stasta vd., 2006; Dominguez vd., 2006; Shao vd., 2010; Li vd., 2014). Arıtma çamurunun kurutulması ise maliyeti arttıran bir unsur olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda atık çamur içindeki nem avantajlı kılacak yöntemler olan hidro-sıvılaştırma (Huang vd, 2013; Malins vd., 2015), hidrotermal gazlaştırma (Basu, 2010) ve hidrotermal karbonizasyon (Wang vd., 2018) ön plana çıkmıştır.

Son yıllarda özellikle fonksiyonelleştirilmiş karbon malzemelerin sentezinde kullanılan hidrotermal karbonizasyon, suyu karbonizasyon ortamı olarak kullanan, düşük sıcaklıklarda (130-250°C) ve kendiliğinden oluşan basınç altında gerçekleştirilen bir termokimyasal süreçtir (Marinovic vd., 2015). Bu süreçte karbonca daha zengin bir katı olan hidrokok, yine kullanılan hammaddeye bağlı olarak farklı içeriklere sahip sıvı fraksiyon ve az bir miktar gaz faz elde edilir. Elde edilen hidrokokun

morfolojisinin kontrol edilebilir olması ve yüzeyinde polar grupların (oksijenli grupların) varlığı bu hidrokoklara fonksiyonellik katabilmeyi mümkün kılar. Elde edilen hidrokok katı yakıt olarak değerlendirilebildiği gibi enerji depolama, tarımsal arazileri ıslah etme, adsorban, katalizör ve aktif karbon üretmek için de kullanılmaktadır (Jain vd., 2016; Koottatep vd., 2016; Liu vd., 2018).

Aritma çamurunun hidrotermal karbonizasyonu ile çamurun sanitasyonu, stabilizasyonu ve susuzlandırması aynı anda gerçekleşmektedir (Danso-Boateng, 2015). Zhao ve diğerleri (2014) hidrotermal işlemin susuzlandırmayı kolaylaştırdığını ve daha az enerji harcadığını göstermiştir. Ayrıca hidrotermal karbonizasyonla arıtma çamurundan elde edilen hidrokokun yanma karakteristiklerinin orijinal arıtma çamurunun yanma karakteristiklerinden daha iyi olduğu belirtilmiştir (He vd., 2013; Liu ve Balasubramanian, 2014; Kambo ve Dutta, 2015; Smith vd., 2016). Arıtma çamuru hidrokokunun gazlaştırma kullanılmasıyla hidrojen daha zengin bir sentez gazı elde edildiği görülmüştür (Gai vd., 2016).

Hidrotermal işlem, arıtma çamurunun yüzey morfolojisini de etkilemektedir. 150°C'nin altında gerçekleştirilen hidrotermal işlemlerde makro gözenekli yapı elde edilirken, 150°C'nin üstünde mikro gözenekli yapı elde edilmiştir (Wang vd., 2017). Gözenek yapısındaki bu değişim, hidrokokun daha az nem tutmasına neden olmaktadır. 180°C'nin üstünde ise daha az negatif yüzey yükü ve daha hidrofobik bir yapı elde edilmiştir (Wang vd., 2017).

Literatürdeki çoğu çalışma, hidrotermal karbonizasyon yöntemini arıtma çamurunun susuzlaştırılması, stabilizasyonu ve yüzey özelliklerinin değiştirilmesi için değerlendirmiştir. Arıtma çamuru hidrokokunun yakıt özelliklerinin değerlendirilmesi ve termal bozunma davranışları çalışılmış bir konu değildir. Çalışmanın amacı hidrotermal karbonizasyon yöntemini kullanarak atık çamuru daha kullanışlı bir yakıt olan hidrokoka

dönüştürmektir. Bu amaçla sabit sıcaklıkta farklı reaksiyon sürelerinde hidrotermal işlem gerçekleştirilmiş, böylece reaksiyon süresinin dönüşüm üzerine etkisi, yakıtın uçucu madde, sabit karbon, kül ve ısı değerine etkisi değerlendirilmiş, ayrıca hidrokokun piroliz ve yanma karakteristikleri incelenmiştir.

## Materyal ve Yöntem

### Materyal

Deneysel çalışmada kullanılan arıtma çamuru, Kocaeli belediyesinin sınırları içinde bulunan evsel atıksuların arıtıldığı, uzun havalandırma aktif çamur prosesine sahip bir atıksu arıtma tesisinden alınmıştır. Çamur yaşı 12 gün olup, proses sırasıyla iki kum tutucu, havalandırma, son çöktürme havuzu, yoğunlaştırıcı ve dekantörden oluşmaktadır. Deneylede kullanılan arıtma çamuru, atıksu arıtma tesisinin çöktürme havuzu sonrası ve anyonik polielektrolit karışımının eklendiği yoğunlaştırıcıdan önce alınmıştır. Bunun nedeni polielektrolitin etkisi olmadan çamurun hidrotermal karbonizasyonunu görmek içindir. Tesisten çıkan çamurun katı madde oranının %21-24 arasında olduğu görülmüştür. Deneylede başlamadan önce atık çamur dinlendirilmiş, yaklaşık 2.4µm gözenek çaplı mavi bantlı (yavaş akış sağlayan) filtre kâğıdından süzülüş ve 20g ham çamur nem analizi için ayrılmıştır. Diğer kısım ise deneylede kullanılmak üzere soğutucuda bekletilmiştir.

### Metot

Hidrotermal karbonizasyon deneylelerinde 10g ham arıtma çamuru (katı/sıvı oranı=1/4 (w/w)) 100ml hacme sahip paslanmaz çelik otoklav reaktör içine konularak reaktör kapağı sıkıca kapatılmıştır. 220°C'de etüv içinde 45dk, 90dk ve 120dk süreyle hidrotermal reaksiyon gerçekleştirilmiştir. Süre sonunda otoklav reaktör etüvden çıkarılarak hızlıca soğutulmuş; hidrokok ve sıvı fraksiyon birbirinden ayrılmıştır. Elde edilen hidrokok 105 °C'de 24 saat süreyle kurutulmuştur. Deneylede tekrar edilerek katı madde dönüşüm oranlarının tutarlılığına bakılmıştır.

### Analizler

Atık çamurun ve atık çamurdan elde edilen hidrokokun ısı değerine, yaklaşık analizine, yapısal analizine ve piroliz-yanma karakteristiklerine bakılmıştır. Enerji içeriği bomba kalorimetre ile (IKA C5003); yaklaşık analizi (nem, uçucu madde, sabit karbon ve kül içeriği) termogravimetrik analiz ile (Seiko TG/DTA 6300), yapısal analizi Fourier dönüşüm infrared spektroskopisiyle (FTIR) (Perkin Elmer, Spectrum 100) ve piroliz-yanma karakteristikleri ise termogravimetrik analiz ile azot ve hava atmosferi altında yapılmıştır. Azot altında yapılan termogravimetrik analizlerde numune önce 10°C/dk ısıtma hızında 105°C'ye getirilmiştir. 10 dakika bu sıcaklıkta tutulmuştur. Daha sonra 40°C/dk ısıtma hızında 600°C'ye getirilmiş ve 7 dakika bu sıcaklıkta tutulmuştur. Hava atmosferinde gerçekleştirilen termogravimetrik analizlerde numune 40°C/dk ısıtma hızında 600°C'ye getirilmiş ve 7 dakika bu sıcaklıkta tutulmuştur.

### Bulgular

Hidrotermal karbonizasyon sonrası hidrokok, sıvı faz (ağırlıklı olarak su) ve az miktar gaz faz

(ağırlıklı olarak CO<sub>2</sub>) oluşmuştur. Tablo 1, atık çamurun içindeki katı maddenin hidrotermal karbonizasyon sürecindeki dönüşümünü göstermektedir. Dönüşüme katı madde üzerinden bakmak gerekir. 105°C'de 24 saat kurutulan çamur ortalama %19,1'i kuru madde içermektedir. Hidrotermal karbonizasyon ile ortalama %50 oranında hidrokok alınabildiği görülmektedir. Ayrıca, reaksiyon süresinin dönüşüm üzerinde çok büyük bir etkisi olmadığı da söylenebilir.

Benzer bir sonuç Danso-Boateng ve diğerleri (2015)'in %4.3 katı madde içeren atık çamurla farklı sıcaklıklarda (140, 160, 180 ve 200°C) ve farklı alıkonma sürelerinde (15, 30, 60, 120 ve 240dk) yaptığı çalışmasında da görülmüştür. Bu çalışmada sıcaklık, alıkonma süresine kıyasla daha etkin bir parametre olarak belirtilmiştir. Düşük sıcaklıklarda daha uzun reaksiyon süresinin gerekliliği vurgulanmıştır. Öyle ki 180°C - 60dk ve 200°C - 30dk şartlarında elde edilen hidrokokların optimum C/H ve C/O oranlarını verdiği belirtilmiştir. Wang ve diğerleri (2018) yapmış olduğu çalışmasında reaksiyon süresinin önemli olduğunu fakat sıcaklıkla karşılaştırıldığında dönüşüm üzerine daha az etkidiğini belirtmiştir.

**Tablo 1.** Hidrotermal karbonizasyon dönüşüm verimleri

Karbonizasyon Süresi (dk)	Aritma Çamuru (g)	Aritma Çamuru İçindeki Katı Madde Miktarı (g)	Hidrokok (g)	Katı Madde Dönüşümü(%)
45	10.32	1.96	1.09	56
	10.34	1.96	1	51
	10.09	1.87	0.94	50
90	10.17	1.80	0.88	49
	10.22	1.47	0.71	48
	10.08	1.56	0.76	49
120	10.55	1.48	0.72	49
	10.08	1.40	0.68	49
	10.05	1.41	0.68	48

Hidrotermal karbonizasyon süresince bir seri dehidrasyon ve dekarboksilasyon reaksiyonları nedeniyle atık çamurun sahip olduğu uçucu madde, sabit karbon, kül içerikleri ve ısı değeri değişmektedir. Tablo 2, atık çamurdan elde edilen hidrokokların yaklaşık analizini göstermektedir. Ham atık çamurun kuru bazda ısı değeri 3850 cal/g olup uçucu madde içeriği %50.5, sabit karbon içeriği %13.5 ve kül içeriği %32.1'dir. Atık çamurun daha uzun sürelerde hidrotermal karbonizasyona alınması uçucu madde içeriğini azaltmış, sabit karbon içeriğini de artırmıştır.

Peng ve diğerleri (2016) yapmış olduğu çalışmada evsel arıtma çamurunu 180-300°C'de ve 30-480dk süreyle hidrotermal karbonizasyona almıştır. Dehidrasyon ve dekarboksilasyon reaksiyonları nedeniyle O/C ve H/C oranlarının azaldığı görülmüştür. Çalışmalarında 300°C ve 30 dk'lık reaksiyon süresini en uygun şartlar olarak belirlemişlerdir. Her ne kadar karbon yüzdesi artmış olsa da ısı değerde pek bir artış gözlemlenmemiş, orijinal atık çamurun (susuz bazda) ısı değerinin 1.02-1.10 katı kadar değiştiği tespit edilmiştir.

Zhao ve diğerleri (2014) yapmış olduğu çalışmada ortalama %85.94 nem değerine sahip aktif çamuru hidrotermal işleme almışlardır. 180, 200, 220 ve 240°C işlem sıcaklıklarında ve reaksiyon süresinin 15-45 dk arasında değiştiği reaksiyon şartlarında gerçekleştirilen deneylerde, denenen tüm sıcaklıklarda 15dk olan reaksiyon süresinin sabit karbon yüzdesini de ısı değeri de artırmadığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda artan sıcaklıkla ve artan süreyle ısı değerinin her zaman lineer bir ilişkisi olmadığı da belirtilmiştir.

Tablo 2, ısı değeri açısından incelendiğinde uçucu maddenin azalmasının karbonizasyondan daha etkin olduğu düşünülebilir. Bunun nedeni ısı değerinin düşüşünde uçucu maddenin azalmasının atık çamurun karbonizasyonuna kıyasla daha önemli bir rolü olmasıyla açıklanabilir. Artan sabit karbona karşı azalan ısı değeri sonuçları Zhao ve diğerleri (2014) ve

Peng ve diğerleri (2016) çalışmalarında da görülmüştür.

**Tablo 2.** Arıtma çamuru numunelerinin ısı değerleri

	Uçucu madde (%)	Sabit karbon (%)	Kül (%)	Isıl değer (cal/g)
Arıtma çamuru (Kurutulmuş)	50.5	13.5	32.1	3850
HTC 45*	30.3	8	61.7	3739
HTC 90**	31.2	14	54.8	3043
HTC 120***	25.9	18.7	55.4	2586

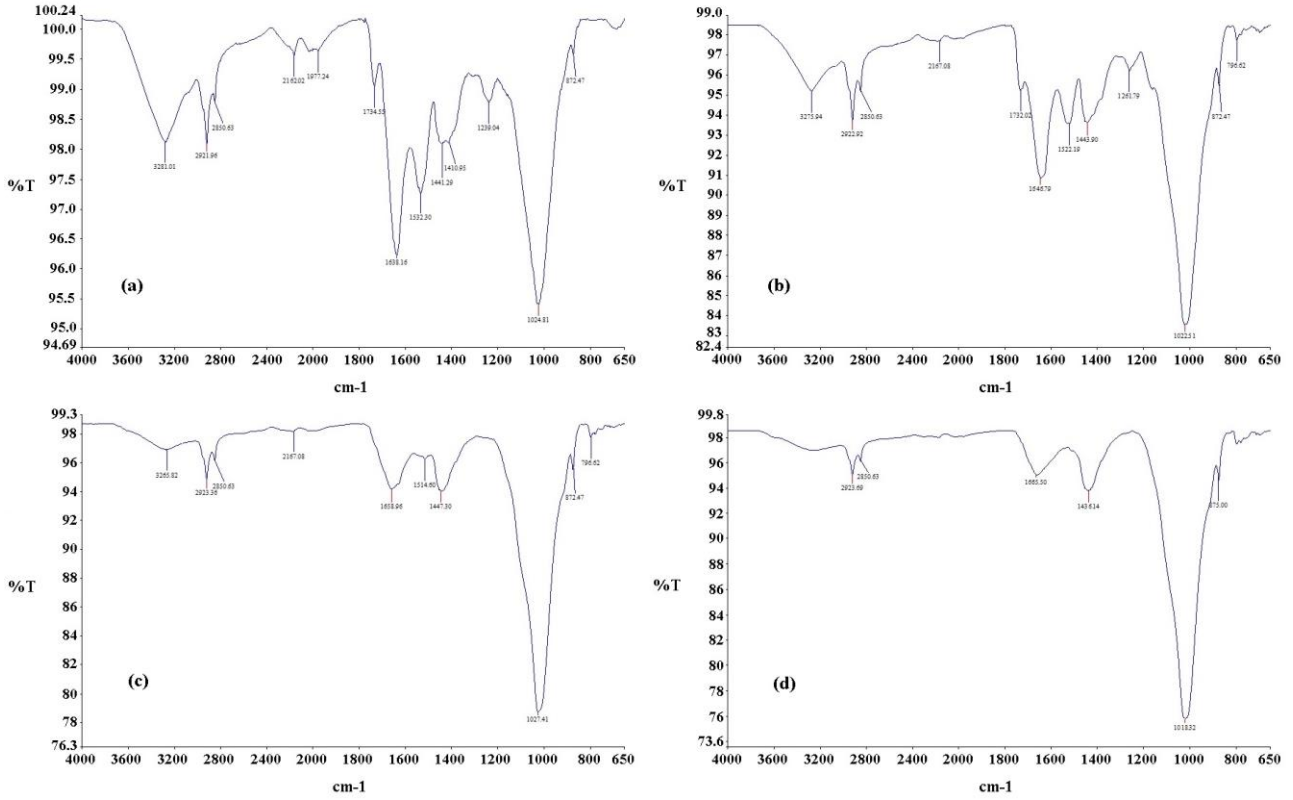
\*HTC 45- 45dk'lık karbonizasyon süresinde elde edilen hidrokok

\*\*HTC 90- 90dk'lık karbonizasyon süresinde elde edilen hidrokok

\*\*\*HTC 120- 120dk'lık karbonizasyon süresinde elde edilen hidrokok

Arıtma çamuru ve hidrokoklarının bağ yapılarını gösteren Fourier Donusumlu Kizilotesi (FTIR) spektroskopileri Şekil 1'de görülmektedir. Orijinal atık çamurun FTIR analizinde 3400-3200 cm<sup>-1</sup> bant aralığındaki titreşimler hidroksil (-OH) gruplarını, 3000-2800 cm<sup>-1</sup> bant aralığı alifatik karbonları (-CH<sub>x</sub>) daha da detaylandırmak gerekirse asimetric ve simetric olmak üzere 2950-2850 cm<sup>-1</sup> bant aralığı metilen (-C-H) gruplarını, 1720 cm<sup>-1</sup> bantı yağ asitleri (C=O) gruplarını, 1640 cm<sup>-1</sup> bantı tipik keton (-C=O) ve amit (-COO) gruplarının gerilme titreşimini, 1540 cm<sup>-1</sup> bantı amit gruplarını (-N-H), 1440 cm<sup>-1</sup> bantı aromatik karbon (-C=C) gruplarını, 1410 cm<sup>-1</sup> bantı karboksil asitlerin (COO<sup>-</sup>) veya amit (C-N) gruplarını, 1240 cm<sup>-1</sup> bantı amit (-C-N) ve ester (-C-O-C) gruplarını, 1030 cm<sup>-1</sup> bantı alifatik eter (-C-O-R) grupları ve alkol (-C-O) gruplarının varlığını temsil etmektedir. Hidrotermal karbonizasyon sonucu elde edilen atık çamur hidrokoklarının bağ yapılarının reaksiyon süreleriyle değişimine bakıldığında ilk göze çarpan, dehidrasyonun



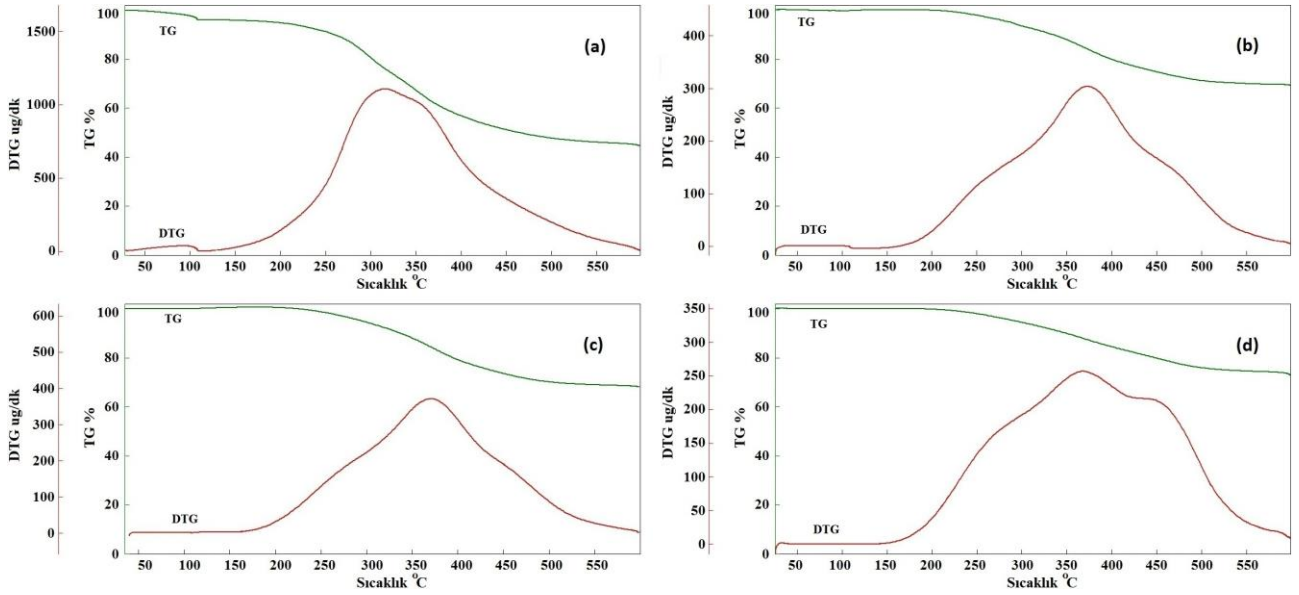


**Şekil 1 .** Arıtma çamuruna (a), 45 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (b), 90 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (c) ve 120 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka ait FTIR grafikleri.

sonucu 3400-3200  $\text{cm}^{-1}$  bant aralığında bulunan hidroksil ve karboksil gruplarındaki azalmadır. Amit ve karboksilat gruplarının gerilme titreşiminin görüldüğü 1640  $\text{cm}^{-1}$  bandının 90 ve 120 dakikalık reaksiyon sürelerinde elde edilen hidrokoklarda bulunmadığı görülmüştür. Ayrıca amitlerin hidrolizini bütün çalışılan reaksiyon sürelerinde görmek mümkün olup, 1540  $\text{cm}^{-1}$  bandında bulunan pikin tamamen ortadan kalkması bununla ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte, aromatisasyon reaksiyonları nedeniyle, 800-650  $\text{cm}^{-1}$  bant aralığında aromatik grupların oluştuğu gözlenmiştir. Hidrotermal karbonizasyonun, arıtma çamurunun yüzey özelliklerini etkilediği ve yapısındaki bileşenleri değiştirerek oksijenli fonksiyonel grupları fazlaştırdığı görülmüştür. Reaksiyon süresinin özellikle yüzey özellikleri üzerine etkisi olduğu Sevilla ve Fuertes (2009) ile Romero-Anaya (2014)'nin çalışmalarında görülmüştür. Mikro gözenekli yapıların oluşumunun daha uzun

reaksiyon süresine ihtiyaç duyduğu belirtilmiştir.

Arıtma çamurunun ve ham çamurdan elde edilen hidrokokların piroliz ve yanma karakteristiklerinin çıkarıldığı termogravimetrik analiz sonuçları Şekil 2 ve Şekil 3'de görülmektedir. Arıtma çamurunda ve arıtma çamurundan elde edilen hidrokoklarda piroliz tek kademe gerçekleşmiş, sadece sıcaklık aralıkları ve maksimum kütle kayıplarının görüldüğü sıcaklıklar farklılaşmıştır. Atık çamurun devolatilizasyonu süresince en fazla kütle kaybının 226°C ile 461°C olduğu görülmüştür. Maksimum kütle kaybı ise 315°C'de gözlemlenmiştir. İncelenen tüm reaksiyon sürelerinde, hidrotermal karbonizasyon ile uçucu madde miktarının azalması ve sabit karbon içeriğinin artmasıyla devolatilizasyon daha geç sıcaklıkta başlayıp daha geç bir sıcaklıkta sonlanmışır. 45, 90 ve

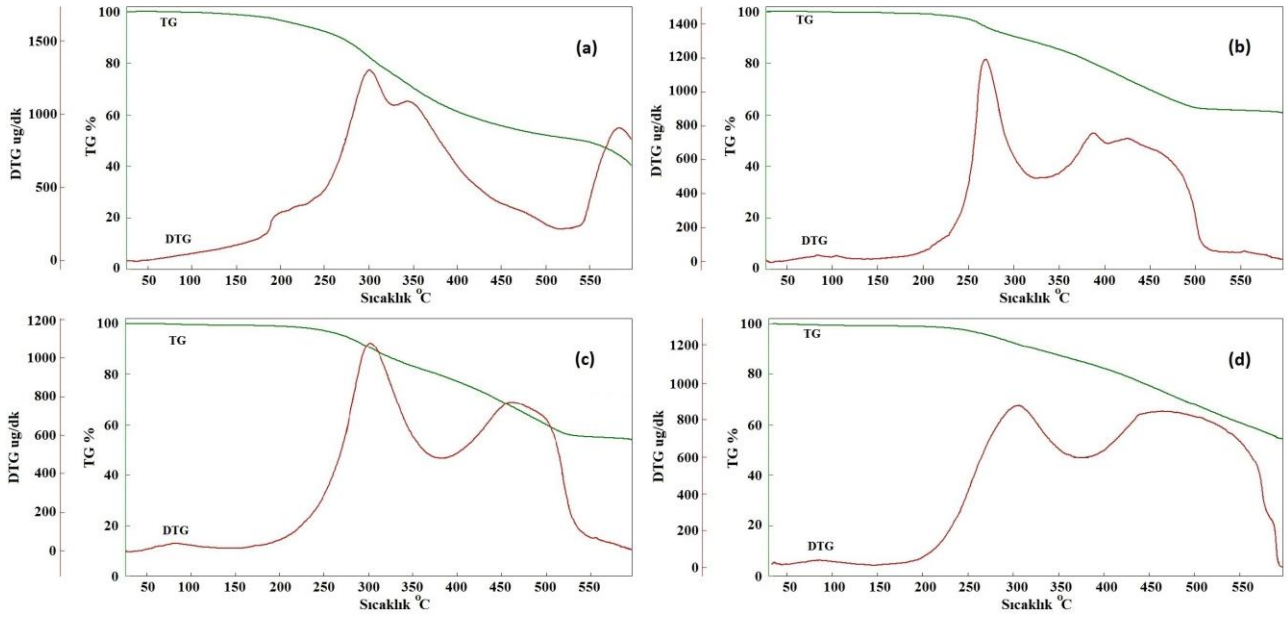


**Şekil 2.** Arıtma çamuruna (a), 45 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (b), 90 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (c) ve 120 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka ait TGA analizi (azot atmosferi altında)

120dk reaksiyon sürelerinde elde edilen hidrokokların devolatilizasyonunda en fazla kütle kaybının gözlemlendiği sıcaklıklar sırasıyla 239.8°C-478.2°C, 233°C-538.7°C ve 184°C-528°C'dir. Hidrotermal karbonizasyon sırasında hidroliz olan ve düşük sıcaklıklarda bozulan yapıların ayrılması nedeniyle maksimum kütle kayıplarının görüldüğü sıcaklıklar ötelenmiştir. Fakat bu ötelenmede reaksiyon süresinin etkisi yoktur. Şöyle ki 45dk reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka maksimum kütle kaybı 373.2°C'de görünürken 90dk'da elde edilen hidrokoka bu değer 371.2°C ve 120dk'da elde edilen hidrokoka ise 367.4°C'dir.

Yanma işlemini, dehidrasyon, devolatilizasyon (ve aynı anda uçucuların yanması) ve katı yüzeyinde yanma olarak aşamalandırmak mümkündür. Hidrokokların yanma karakteristikleri kendilerini oluşturan hammaddeye kıyasla daha farklıdır. Arıtma çamuru ve arıtma çamuru hidrokokları için hava ortamında yapılan ve Şekil 3'de verilen termogravimetrik analizlerde bu farklılığı görmek mümkündür. Kurutulmuş arıtma çamurunun yanması iki kademede gerçekleşmiş, bu kademelerden birincisi olan uçucuların

oluşumu ve uçucuların yanması geniş bir sıcaklık aralığına (200-500°C) yayılmıştır. Sabit karbonun oksidasyonu nedeniyle oluşan kütle kaybı ise daha dar bir sıcaklık aralığında (542-601°C) gerçekleşmiştir. Tutuşma sıcaklığının 239.6°C olduğu ve oksidasyon nedeniyle maksimum kütle kayıplarının da 300.6°C ve 582.3°C'de olduğu görülmektedir. Hidrotermal işlem sonrasında, uçucu maddenin azalmasına bağlı olarak uçucuların oluşması ve tutuşması daha dar bir sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. 45dk reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoklarda bu sıcaklık aralığı 246.5-299.6°C iken, 90dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoklarda bu aralık 249.4-356.4°C arasında olmuştur. Sabit karbonun artmasına bağlı olarak da hidrokoklarda sabit karbonun oksidasyonuna karşılık gelen sıcaklık aralığı artmıştır. Elde edilen hidrokokların hepsinde tutuşma sıcaklığı 239-241°C arasında değişmektedir. Maksimum kütle kayıplarının görüldüğü sıcaklıklar da çok büyük farklılıklar göstermemektedir. Uçucuların oksidasyonuna ait kütle kaybının en fazla olduğu sıcaklık 268-305°C arasında değişirken, sabit karbonun oksidasyonuna ait en fazla kütle kaybının görüldüğü sıcaklık 426-465°C arasında değişmektedir.



**Şekil 3.** Arıtma çamuruna (a), 45 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (b), 90 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka (c) ve 120 dk'lık reaksiyon süresinde elde edilen hidrokoka ait TGA analizi (hava atmosferi altında)

## Sonuçlar ve Tartışma

Arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonu üzerine yapılan çalışma, hidrokokun arıtma çamuruna kıyasla daha iyi özelliklere sahip bir yakıt olduğunu göstermiştir. 220°C'de yapılan hidrotermal karbonizasyon reaksiyonlarında ve 45, 90 ve 120dk'lık karbonizasyon sürelerinde katı madde dönüşümü ortalama %50'dir. Reaksiyon süresinin dönüşüm üzerinde etkisi görülmemiştir. Fakat reaksiyon süresinin yakıt özelliklerini ve hidrokokun yapısını oldukça etkilediği saptanmıştır. Karbonizasyon süresini göz önüne alırsak, 90dk reaksiyon süresinin yeterli olduğu, 3043cal/g ısıl değere sahip, %31.2 uçucu madde ve %14 sabit karbon içeriğiyle kuru arıtma çamuruna göre daha iyi bir yakıt elde edildiği görülmüştür. Arıtma çamurunun yapısı gereği uçucu maddenin kaybı ısıl değerinin düşmesine oldukça katkı yapmıştır. Dolayısıyla uzun reaksiyon süresi daha az uçucu madde ve daha az ısıl değere sahip hidrokok eldesine neden olmuştur. Karbonizasyon süresinin ayrıca yüzeyde oksijen içeren fonksiyonel grupların artışına neden olduğu FTIR analizlerinden görülmüştür.

Arıtma çamurunun kurutulması ve arıtma çamuru hidrokokunun kullanılması karşılaştırıldığında iki işlemin enerji ihtiyacının ve elde edilen nihai ürünün enerji içeriğini kıyaslamak gerekir. Zhao ve diğerleri (2014) yapmış olduğu çalışmada arıtma çamurunun hidrotermal karbonizasyonuna ait kütle ve enerji denliğini çıkarmış ve arıtma çamurunun kurutulması ve daha sonradan yakılarak enerji elde edilmesini karşılaştırmıştır. 200°C ve 30dk süre ile yapılan hidrotermal karbonizasyonla elde edilen hidrokokun yanmasıyla elde edilen enerjinin %47.6'sı ısı veya güç olarak değerlendirilebilirken, %52.4'u hidrotermal reaktörün enerji ihtiyacı, mekanik susuzlandırma ve kurutma (zorlanmış evaporasyon) için kullanılabilen hesaplanmıştır. Ayrıca, %85.94 neme sahip 1 ton arıtma çamuru için kuru bazda sahip olduğu enerjisine ek olarak 5.3MJ enerji gerektiği belirtilmiştir. Bu durumda hidrotermal karbonizasyonun, doğrudan kurutma ve yakma proseslerine göre daha avantajlı olduğu açıktır. Benzer şekilde Stucki ve diğerleri (2015), arıtma çamurunun kurutulması ve daha sonra yanması ile hidrotermal karbonizasyon süreci arasındaki enerji ihtiyacını karşılaştırmıştır. Bu çalışmaya göre hidrokokun yanmasıyla elde

edilen enerjiyle ısı ihtiyacını %62 oranında, elektrik ihtiyacını %69 oranında azaltmak mümkündür.

## Kaynaklar

- Basu, P. (2010). Hydrothermal Gasification of Biomass. *Biomass Gasification and Pyrolysis* (s. Chapter 7). Academic Press.
- Danso-Boateng, E., Holdich, R.G., Martin, S.J., Shama, G., Wheatley, A.D. (2015). Process energetics for the hydrothermal carbonisation of human faecal wastes. *Energy Conversion and Management*(105), 1115-1124.
- Dominguez, A., Menendez, J., & Pis, J. (2006). Hydrogen Rich Fuel Gas Production from the Pyrolysis of Wet Sewage Sludge at High Temperature. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*(77 (2)), 127-132.
- Fonts, I., Azuara, M., Gea, G., Murillo, M.B. (2009). Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*(85), 184-191.
- Gai, C., Guo, Y., Liu, T., Peng, N., & Liu, Z. (2016). Hydrogen-rich Gas Production by Steam Gasification of Hydrochar Derived from Sewage Sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*(41), 3363-3372.
- He, C., Giannis, A., & Wang, J. (2013). Conversion of Sewage Sludge to Clean Solid Fuel Using Hydrothermal Carbonization: Hydrochar Fuel Characteristics and Combustion Behavior. *Applied Energy*(111), 257-266.
- Huang, H., Yuan, X., Zhu, H., Li, H., Liu, Y., Wang, X., & Zeng, G. (2013). Comparative Studies of Thermochemical Liquefaction Characteristics of Microalgae, Lignocellulosic Biomass and Sewage Sludge. *Energy*(56), 52-60.
- International Energy Agency (IEA), *Key World Energy Statistics 2017*, IEA/OECD, Paris, 2017.
- Jain, A., Balasubramanian, R., Srinivasan, M.P. (2016). Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*(283), 789-805.
- Kambo, H., & Dutta, A. (2015). Comparative Evaluation of Torrefaction and Hydrothermal Carbonization of Lignocellulosic for the Production of Solid Biofuel. *Energy Conversion and Management*(105), 746-755.
- Kliopova, I., Makarskiene, K. (2015). Improving material and energy recovery from sewage sludge and biomass residues. *Waste Management*(36), 269-276.
- Koottatep, T., Fakkaew, K., TaiTai, N., & Pradeep, S. v. (2016). Sludge Stabilization and Energy Recovery by Hydrothermal Carbonization Process. *Renewable Energy*(99), 978-985.
- Li, S., Li, Y., Lu, Q., Zhu, J., Yao, Y., & Bao, S. (2014). Integrated Drying and Incineration of Wet Sewage Sludge in Combined Bubbling and Circulating Fluidized Bed Units. *Waste Management*(34), 2531-2566.
- Liu, F., Yu, R., Ji, X., Guo, M. (2018). Hydrothermal carbonization of holocellulose into hydrochar: structural, chemical characteristics, and combustion behavior. *Bioresource Technology* (26), 508-516.
- Liu, Z., Balasubramanian, R. (2014). Upgrading of waste biomass by hydrothermal carbonization (HTC) and low temperature pyrolysis (LTP): a comparative evaluation. *Applied Energy*(114), 857-864.
- Malins, K., Kampars, V., Brinks, J., Neibolte, I., Murnieks, R., & Kampare, R. (2015). Bio-oil from Thermo-Chemical Hydro-Liquefaction of Wet Sewage Sludge. *Bioresource Technology*(187), 23-29.
- Marinovic, A., Pileidis, F.D., Titirici, M.M. (2015). Hydrothermal carbonization (HTC): History, State-of-the-art and Chemistry. Porous Carbon Materials from Sustainable Precursors. *RSC Green Chemistry*(32), 129-155.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*(83), 37-46.
- Peng, C., Zhai, Y., Zhu, Y., Xu, B., Wang, T., Li, C., Zeng, G. (2016). Production of char from sewage sludge employing hydrothermal carbonization: Char properties, combustion behavior and thermal characteristics. *Fuel* (176), 110-118.
- Romero-Anaya, A.J., Ouzzine, M., Lillo-Rodenas, M.A., Lineras-Solano, A. (2014). Spherical carbons: synthesis, characterization and activation processes. *Carbon*(68), 296-307.
- Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(15), 2262-2289.
- Sevilla, M., & Fuertes, A. (2009). The Production of Carbon Materials by Hydrothermal Carbonization of Cellulose. *Carbon* (47), 2281-2289.
- Shao, J., Yan, R., & Chen, H. Y. (2010). Catalytic Effect of Metal Oxides on Pyrolysis of Seag

- Sludge. *Fuel Processing Technology*(91), 1113-1118.
- Smith, A., Singh, S., & Ross, A. (2016). Fate of Inorganic Material During Hydrothermal Carbonization of Biomass: Influence of Feedstock on Combustion Behaviour of Hydrochar. *Fuel*(169), 135-145.
- Stasta, P., Boran, P., Bebar, J., Stehlik, L., & Oral, P. (2006). Thermal Processing of Sewage Sludge. *Appl. Therm. Eng.*(26 (13)), 1420-1426.
- Stucki, M., Eymann, L., Gerner, G., Hartmann, F., Wanner, R., Krebs, R. (2015). Hydrothermal carbonization of sewage sludge on industrial scale: energy efficiency, environmental effects and combustion. *Journal of Energy Challenges and Mechanics*(2), 38-44.
- Wang, T., Zhai, Y., Zhu, Y., Li, C., Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: Process conditions, Fundamentals, and physicochemical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(90), 223-247.
- Wang, L., Li, A., & Chang, Y. (2017). Relationship Between Enhanced Dewaterability and Structural Properties of Hydrothermal Sludge after Hydrothermal Treatment of Excess Sludge. *Water Research*(112), 72-82.
- Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., Yoshikawa, K., (2014). Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization, *Energy Conversion and Management*(78):815-821.

## Hydrothermal carbonization of sewage sludge for energy recovery

### Extended abstract

*Due to several reasons such as the increase in population, the change in consumption habits, rapid and wrong urbanization and developments in technological devices, the energy demand increases day by day. Based on the energy supply data for the year 2015, the biggest share of the supply is provided by fossil resources, which also brings several environmental and health problems related with fossil based CO<sub>2</sub> emission and resultant global warming.*

*By admitting that the fossil fuel dependence will continue in coming years, the only way of decreasing the effect of fossil fuel consumption is increasing the share of renewable resources.*

*Among the renewable resources, biomass is the unique resource that can be used directly to obtain energy or converted to a bio-based chemical or bio-based material.*

*Biomass can be defined as “an organic matter, which is originated from plants, animals and their wastes produced through their treatment”. Due to biomass includes a great variety of materials in different amounts, it has a huge potential for both energy and material production.*

*Sewage sludge is a very good biomass resource because of its production in high quantities and the high concentration of biodegradable organic fraction (in dry form). Sewage sludge is actually a product of either physical, chemical and biological waste treatment facilities, which has different amount of biodegradable solid material based on the treatment method. There are several methods for the final treatment and disposal of sewage sludge but each of them requires the water removal to some degree (at least 85% of dry matter content for incineration). In the recent years, the water content of the biomass receives a special attention for the processes that require water in the reaction medium.*

*Hydrothermal treatment methods including hydrothermal gasification, hydrothermal drying and hydrothermal carbonization require water in reaction medium at high temperature (and most of the time accompanied with self generated pressure). Among the hydrothermal methods, hydrothermal*

*carbonization has been receiving a special attention due to its high carbon rich fraction, which can be used as a fuel or as a carbon rich porous material (after activation).*

*Hydrothermal carbonization is a thermochemical process, which uses water as the reaction medium and requires mild temperatures (130-250°C) and self generated pressure at corresponding temperature. This process produces a carbon rich solid fraction (which is also called “hydrochar”), a liquid fraction that includes soluble fraction and a very small amount of gaseous fraction mainly including CO<sub>2</sub>. The carbon content, heating value, porosity, hydrophobicity characteristics of hydrochar is strongly dependent on reaction temperature, reaction period and the type of biomass.*

*This study involves the hydrothermal carbonization of sewage sludge, specifically the effect of reaction period on structure, volatile matter content, fixed carbon content and heating value of hydrochar. 10g of sewage sludge (as received – solid/liquid ratio: 1/4 (w/w)) is placed in 100ml autoclave reactor, where the reaction temperature was kept at 220°C for 45, 90 and 120min. At the end of the reaction period, the reactor is cooled and hydrochar is separated from liquid phase. Hydrochar is dried at 105°C for 24h.*

*For sewage sludge and each of the hydrochars, several analysis were done including heating value, proximate analysis, FTIR analysis and pyrolysis-combustion characteristics by using thermogravimetric analysis. Based on the experimental results, 50% of the solid material was converted to hydrochar, and this conversion percentage was not dependent on reaction period. This is mainly due to the reason that reaction temperature is more effective than reaction period. Since the temperature in the experiments were kept at 220°C, the effect of reaction period was not detectable.*

*Due to dehydration and decarboxylation reactions throughout the hydrothermal carbonization, the structure of each sewage sludge hydrochar was changed resulting a change in volatile matter content, fixed carbon content, ash content, heating value and as well as surface properties. With an increase in reaction period, volatile matter content decreased and fixed carbon content increased (see*

in Table 2). Other researchers also observed the trend in those parameters.

As a conclusion, this experimental study shows that hydrothermal carbonization of sewage sludge produces a solid fuel, which has better properties as compared to dry sewage sludge. The conversion of dry matter is 50% (mean value) at conditions where the temperature is 220°C and at all reaction periods experimented. In other words, reaction period has no effect on conversion at 220°C. But, reaction period affects the heating value, fixed carbon content, volatile matter content and obviously structure. 90min of carbonization period is enough to obtain a hydrochar of 31.2% volatile matter and 14% fixed carbon content with 3043cal/g heating value. After the carbonization, the change in the structure of the dry sewage sludge is obvious, where the oxygen containing groups and aromatic groups are observable in the hydrochar structure.

**Keywords:** Hydrothermal carbonization, Sewage sludge, Hydrochar, Energy recovery



## CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar parametrik analizleri

**Zeynep FIRAT ALEMDAR\***

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[zalemdar@yildiz.edu.tr](mailto:zalemdar@yildiz.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0793-8582, Tel: 0 (212) 383 5142

**Nasibe İNKAYA**

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[nasibe.03@gmail.com](mailto:nasibe.03@gmail.com) ORCID: 0000-0003-2575-7432

Geliş: 02.10.2018, Revizyon: 27.12.2018, Kabul Tarihi: 15.01.2019

### Öz

Depremselliğin önemli olduğu Türkiye’de yapı elemanları, yatay yükler altında gerekli ve yeterli performansı gösterebilmeleri açısından, yük taşıma kapasitesinde ve sistem sünekliğinde önemli artışa neden olan lifli polimer (LP) malzeme ile güçlendirilmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemi kullanılarak LP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada geçmişte yapılan deneysel çalışmalar dikkate alınarak ANSYS programında sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Literatürdeki deneysel çalışmalarda kullanılan CFRP malzemenin sistem olarak mekanik özellikleri ASTM D7522 standartlarına uygun olarak laboratuvar şartlarında test edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen CFRP sisteme ait malzeme özellikleri sonlu elemanlar modellerinde dikkate alınmış ve betonarme kirişler statik yükler altında analiz edilmiştir. Sonlu eleman modelleri CFRP genişliği, uygulanan karbon lif kat adedi ve kiriş yan yüzeylerindeki sargı yüksekliğine bağlı olarak farklılaştırılarak CFRP sistemin kiriş performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Uygulanan CFRP sistemin kiriş tabanındaki genişliğinin ve CFRP sistemdeki karbon fiber katman sayılarının artırılması ile betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Kiriş yan yüzeylerinin de CFRP ile sarılması durumunda, kirişin sadece alt yüzeyinin güçlendirildiği referans kirişe göre yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elemanlar yöntemi, lifli polimer, güçlendirme, sıyrılma testi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar



## Giriş

Geleneksel güçlendirme yöntemlerine (mantolama, çelik levha kullanımı ve epoksi enjeksiyonu uygulaması gibi) ilave olarak betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde lifli polimer kullanılması 1980'li yılların ortalarından itibaren günümüze kadar yaygınlaşmıştır. Lifli Polimerler (Fiber Reinforced Polymer, FRP) isimlerini içinde bulundurduğu malzemeye göre alırlar. Örneğin; Karbon Lifli Polimer (CFRP; carbon fiber reinforced polymer), Cam Lifli Polimer (GFRP; glass fiber reinforced polymer), Aramid Lifli Polimer (AFRP; aramid fiber reinforced polymer). Betonarme kirişlerin dışardan FRP uygulanarak güçlendirilmesi, bu kompozit malzemenin yüksek dayanım-ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, farklı kesit şekilleri ve köşelere uygulanabilirlik özellikleri açısından etkin bir metod olarak kabul edilmektedir (Yang vd., 2008).

Karbon lifli polimerler kullanılarak güçlendirilmiş yapısal elemanlarla ilgili deneysel ve teorik sayısız çalışma bulunabilir. Deneysel çalışmalar genellikle CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisine karşı dayanımını belirlemek, korozyon aktivitesini araştırmak, beton ve FRP arasındaki bağ davranışını incelemek ve enerji sönümlenme oranlarının tespiti üzerine yoğunlaşmıştır (Pham ve Al-Mahadi, 2004; Gheorghiu vd., 2007; Masoud ve Soudki, 2006; Jianzhuang vd., 2004; Lee ve Hausmann, 2004; Çetinkaya vd., 2004; Alsayed, 1998; Khalifa ve Nanni, 2000). CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin rijitlik, yük taşıma, kesme kuvveti, süneklik ve enerji sönümlenme kapasitelerinin önemli oranda arttığı ve korozyon nedeni ile ana donatıdaki kütle kaybının azaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca son yıllarda CFRP ile güçlendirilmiş veya onarılmış betonarme kolon elemanlarına ait çalışmalar yapılmış ve bina ve köprü kolonlarında bu güçlendirme tekniğinin pratik bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Özcan vd., 2008; Bousias vd., 2004; Iacobucci vd., 2003; Sause vd., 2004; Seible vd., 1997; Sheikh ve Yau, 2002;

Xiao ve Ma, 1997). İlk tam ölçekli deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi ve karbon elyaf üreticisi DowAksa işbirliği ile yapılmıştır. Bu çalışmada Yalova'da tam ölçekli, aynı temel ve yapı malzemeleri kullanılarak 2007 Deprem Yönetmeliği'nden önceki geleneksel yöntemler ile üç katlı iki adet bina inşa edilmiştir. Binaların birinde kolonlar yüksek mukavemetli CFRP malzeme ile güçlendirilmiş, diğer binada güçlendirme yapılmamıştır. CFRP ile güçlendirilmiş bir binanın olası bir depremde nasıl davranış göstereceği karşılaştırılmalı olarak test edilmiştir. Sismik şok simülasyonu uygulanan test sonunda, CFRP malzeme ile güçlendirilen bina ayakta kalırken, güçlendirilmeyen bina ise yıkılmıştır (Şekil 1). Güçlendirilmeyen bina 3. günün sonunda 0,0135 öteleme oranında yıkılmasına rağmen güçlendirilen bina 0,15 öteleme oranında dahi yıkılmamıştır (Pitilakis, 2018).



Şekil 1. Yıkılan bina ve FRP ile güçlendirilip ayakta kalan bina

Literatürdeki teorik çalışmaların çoğu ise FRP ile güçlendirilen betonarme ve çelik kirişlerin sonlu eleman (SE) analizlerini kapsamaktadır. Bu çalışmalarda, FRP'yi uygularken kullanılan yapıştırıcının doğrusal olmayan davranışı, yüzeyden ayrışma mekanizmaları ve arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler (yapıştırıcının kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyinin durumu) incelenmiştir (Rabinovitch, 2005; Sayın ve Manisalı, 2009; Büyüköztürk vd., 2003). Ayrıca analitik modellere uygun olarak deney numuneleri laboratuvar ortamında üretilmiştir. Deneysel sonuçlar nümerik analizler ile karşılaştırılmış ve birbirine oldukça benzer yük- sehim eğrileri elde edilmiştir. Nümerik

sonuçlar incelendiğinde, yapıştırıcı kalınlığının artırılması FRP uzunluğu boyunca kenar kısımda oluşan normal ve kayma gerilmelerinde ve kirişin sehim miktarında azalmaya, fakat kirişlerin ani göçme yapma olasılığına neden olduğunu göstermiştir (Sayın ve Manısalı, 2009). Lineer elastik, nonlinear elastik ve elasto plastik yapıştırıcılar kullanılarak FRP ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesinin ve sünekliklerinin arttığı ve plastik mafsals mekanizması oluşmasının sağlandığı görülmüştür (Rabinovitch, 2005).

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin plastik (doğrusal olmayan) analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki deneysel çalışmalarda kullanılan CFRP malzemenin sistem olarak mekanik özellikleri ASTM D7522 standartlarına uygun olarak test edilmiş ve SE modelinde dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalarla doğrulanan modelde CFRP'nin genişliğinin ve kat adedinin değiştirilmesi ve kirişin yan yüzeylerinin CFRP ile sarılması durumuna göre betonarme kirişlerin yapısal davranışı irdelenmiştir.

### Sıyırılma Testi

ASTM D7522 standardı, epoksi kullanılarak beton yüzeye yapıştırılan CFRP sistemin yüzeyden sıyırılma dayanımını ölçebilmek için test yöntemini tanımlamaktadır. Bu doğrultuda, 100 mm çapa sahip 50 mm yüksekliğinde bir adet ve 100 mm çapa sahip 100 mm yüksekliğinde iki adet silindirik beton numune sıyırılma deneyleri için üretilmiştir. Birincisine 3 kat CFRP, ikincisine 5 CFRP ve üçüncüsüne 7 kat CFRP sarılarak sargı katman sayısının etkisi incelenmiştir.

Test için kullanılan epoksi MasterBrace SAT 4500 lifli polimer sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcısıdır. İki bileşenli, yüksek dayanımlı, solvent içermeyen ve mavi renkli epoksi esaslı özel yapıştırıcı olup FRP sistemi ile güçlendirilecek elemanlarda karbon/cam lifli polimer malzemenin yüzeye yapıştırılması amacıyla kullanılır. Mekanik dayanımlarının yüksek olması, kolay uygulanabilir olması ve

düşük viskoziteye sahip olması sebebiyle tercih edilir. Deneyde kullanılan MasterBrace FRP 300/50 CFH (Yüksek modüllü karbon lifli polimer kumaş) çok hafif ve kolay taşınabilir olması, iki yönde de istenilen ölçülerde kolayca kesilebilir olması, tek yönlü sürekli liflerden oluştuğu için eğilme ve kesmeye karşı yapılan güçlendirmelerde tasarım ve uygulama açısından büyük kolaylık sağlaması, yorulma dayanımının yüksek olması ve sünme değerinin çok düşük olması sebebiyle tercih edilmiştir.

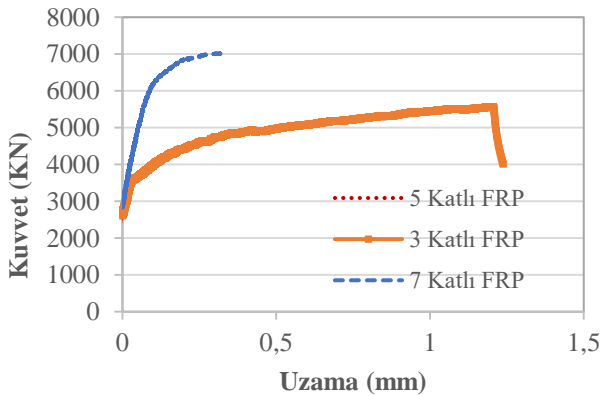
Uygulama öncesinde karbon fiber kumaşlar numunelere göre kesilmiş ve beton numunelerin üst yüzeyleri astarlandıktan sonra epoksi malzeme 0,8-1 mm kalınlık elde edecek şekilde rulo ile sürülmüştür. Kesilmiş lifli polimer kumaşlar FRP lifleri doğrultusunda gerilerek yüzeye yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının kumaş içine emilmesi için rulo ile lifler doğrultusunda bastırılarak hava boşlukları alınmıştır. Bu şekilde 1. numuneye 3 kat, 2. numuneye 5 kat ve 3. numuneye 7 kat olacak şekilde kumaş rulo ile bastırılarak yapıştırıcı içinde lamine edilmiştir. İlk kat için 1,8 kg/m<sup>2</sup>, sonraki her kat için 0,8 kg/m<sup>2</sup> epoksi kullanılmıştır. En üst kata 10 mm kalınlığında dairesel çelik plaka yerleştirilip kurumaya bırakılmıştır.

Daha sonra INSTRON test cihazına numune yerleştirilmiş ve test yüzeyine normal kuvvet uygulanarak sıyırılma testine tabi tutulmuştur (Şekil 2). Kuvvetin uygulanacağı çelik tutamak dikkatli hizalanmalıdır. Bu durum simetrik olmayan ya da karışık modda kopmanın önüne geçecektir. Sıyırılma deneyinde uygulanan kuvvetin yükleme hızı ASTM D7522 Standardının 11.8 maddesine göre 1 MPa/dk olacak şekilde uygulanmıştır. Ayrılma gerçekleşene kadar teste devam edilmiştir.



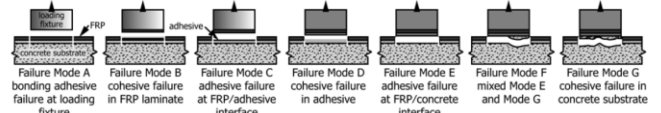
Şekil 2. Sıyırılma testi düzeneği

3 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 3600 N, 5 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 5550 N ve 7 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 7000 N normal kuvvet değerine ulaşıncaya kopma dayanımına ulaşmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sıyırılma testi kopma dayanım grafiği

ASTM D7522 Standardına göre toplamda 7 tip kopma modu vardır. Bunlar A, B, C, D, E, F ve G tipi kopma modlarıdır (Şekil 4). Deney sonuçlarına göre; 3 katlı FRP ile güçlendirilen numune F tipinde, 5 ve 7 katlı FRP ile güçlendirilen numune B tipi kopmaya örnek verilebilir (Şekil 5).



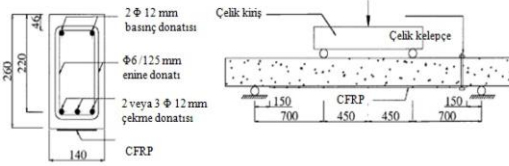
Şekil 4. Sıyırılma testine göre kopma modları



Şekil 5. Sırasıyla soldan F, B ve B tipi kopma modları

### Sonlu Elemanlar Analizi

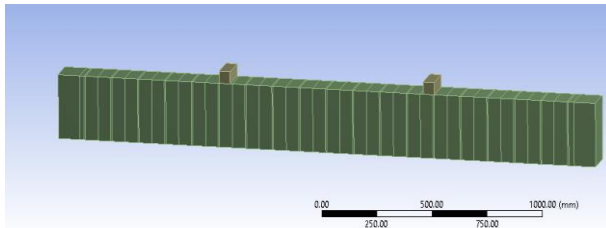
Literatürde bulunan deneysel çalışmaların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. Analizler "Static Structural" modülü ile yapılmış ve çözümlemede statik yükler dikkate alınmıştır. Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarının yaptıkları test çalışmalarının sonlu elemanlar çözümü oluşturulmuştur. Söz konusu araştırmacılara ait deney numunelerinde açıklığı 2300 mm, genişliği 140 mm ve yüksekliği 260 mm olan betonarme kirişler kullanılmıştır (Pham ve Al-Mahadi, 2004). Çalışmadaki test elemanlarından iki kat CFRP kullanılarak alt yüzeyi güçlendirilmiş bir kiriş dikkate alınmıştır. Bu kirişte 12 mm çapında 2 veya 3 adet çekme donatısı, 12 mm çapında 2 adet basınç donatısı ve 6 mm çapında 90 mm aralıkla enine donatı kullanılmıştır. Boyuna ve enine donatıların akma dayanımları sırası ile 504 ve 423 MPa olarak belirlenmiştir. Kirişlerin basınç dayanımı, kontrol kirişi için 57,7 MPa ve CFRP uygulanan kirişler için ortalama 47,7 MPa'dır. Modellemesi yapılan kiriş detayı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı

### Geometrinin Oluşturulması

Beton kiriş, basınç donatıları, çekme donatıları, enine donatı ve CFRP malzeme 3 boyutlu olarak ANSYS programında tanımlanmıştır. Beton kiriş elemanın en kesit geometrisi  $140 \times 260 \text{ mm}^2$  ve kiriş toplam boyu 2500 mm olarak alınmıştır. Model oluşturulurken CFRP kompozitin sonlu eleman noktaları beton elemanın sonlu eleman noktalarına yapıştırılmıştır. Karbon lifli polimer kumaşların kiriş alt yüzeyine yapışması için kullanılan epoksi malzemesi modellenmemiştir. Enine ve boyuna donatılar yüzey alanı aynı kalacak şekilde modelde sonlu elemanlarına ayırma kolaylığı bakımından kare kesit olarak tanımlanmıştır. Yük aktarımı sağlanacak olan bölgeler  $50 \times 50 \text{ mm}$  kesitli 140 mm uzunluğunda çelik plaka olarak modellenmiştir. Şekil 7'de iki katlı FRP kompozitle güçlendirilen betonarme kirişin geometrisi görülmektedir.

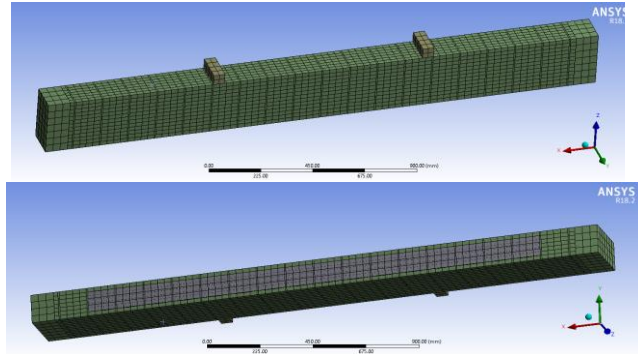


Şekil 7. Güçlendirilmiş kirişin üç boyutlu modeli

### Mesh: Elemanlara Ayırma İşlemi

Sonlu elemanlar programlarında uygulanan mesh işlemi kullanıcının olabildiğince hızlı simülasyon yapması için en doğru ağı oluşturmasını sağlar. Bu çalışmada sonlu eleman tipi "Multizone" olarak seçilmiştir. Temas yüzeylerdeki elemanların sayısının daha fazla olması çözüm hassasiyeti açısından önemlidir. Bu nedenle sonlu eleman ağının boyutu, boyuna donatı kesitinin ölçüsü olan 11 mm olarak seçilmiştir. Modelin sonlu eleman ağı Şekil 8'de gösterilmiştir. Modelde 100.249 adet düğüm

noktası ve yaklaşık 15000 adet eleman bulunmaktadır.



Şekil 8. Modelin sonlu eleman ağı (üstten ve alttan görünüş)

### Mesnet ve Deplasman Koşullarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar programında literatürdeki deneysel çalışmadan elde edilen 30 mm yer değiştirme değeri üç boyutlu modelde tanımlanan çelik plaka yüzeyine yük olarak verilmiştir. Kiriş alt yüzeyine tanımlanan mesnetler kiriş boyuna doğrultusunda (X eksen) hareket edecek, kiriş enkesit eksenlerinde (Y ve Z eksenleri) sabit olacak şekilde mesnet koşulları belirlenmiştir.

### Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Programın malzeme veri tabanından beton malzeme için "Linear İzotropik" ve "Multilinear İzotropik Hardening" malzeme tanımları yapılmıştır. Betonun basınç mukavemet değeri yapılan laboratuvar deneylerinden 47,7 MPa olarak ölçüldüğünden, Elastisite modülü değeri 34530 MPa olarak hesaplanmıştır. Modelde Elastisite modülü çatlamış betonarme kesit hesabı dikkate alındığından %20 değerine düşürülerek 6906 MPa olarak tanımlanmıştır. Betonun maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,004 ve Poisson oranı 0,2 alınmıştır. Beton için Multilinear Isotropic malzeme tanımı Şekil 9'daki gibidir.

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
A	B	C
1 Temperature (C)	1 Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (Pa)
2	2 0	3.09E+06
*	3 0.0001	1.52E+07
	4 0.0009	3E+07
	5 0.0014	3.6E+07
	6 0.0019	4.77E+07
	7 0.0039	4.77E+07
	*	

Şekil 9. Betonun multilinear isotropic malzeme tanımı

Betonun basınç ve çekme yükleri altındaki davranışı farklı olduğundan programda ayrıca Drucker - Prager beton modeli tanımlanmıştır. Bu özellik sayesinde betonun tek eksenli basınç dayanımı 47,7 MPa, tek eksenli çekme dayanımı 0,5 MPa ve çift eksenli basınç dayanımı 48 MPa olarak girilmiştir (Şekil 10).

Drucker-Prager		
Drucker-Prager Base		
Uniaxial Compressive Strength	47.7	MPa
Uniaxial Tensile Strength	0.5	MPa
Biaxial Compressive Strength	48	MPa

Şekil 10. Drucker - Prager beton modeli

Modelde çelik donatılar ve yükleme plakaları için homojen ve izotropik malzeme kullanılmış ve boyuna donatı 11\*11 mm<sup>2</sup>, enine donatı 6\*6 mm<sup>2</sup> kare kesitli olacak şekilde modellenmiştir. Modelde Elastisite modülü ve Poisson oranı lineer izotropik malzeme modeliyle; akma ve pekleşme dayanımları ise çok doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme modeliyle yapılmıştır (Şekil 11).

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
A	B	C
1 Temperature (C)	1 Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (Pa)
2	2 0	5.04E+08
*	3 0.00595	5.04E+08
	4 0.09795	5.99E+08
	*	

Şekil 11. Çeliğin multilinear isotropic malzeme tanımı

Modellemede dikkate alınan deney numunesinde, kullanılan 2 katlı CFRP malzeme 100\*2000 mm boyunda ve 0,76 mm kalınlığında tanımlanmıştır (Şekil 8). Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarının yaptıkları test çalışmalarında kullanılan CFRP kumaşlar için ölçülen Elastisite

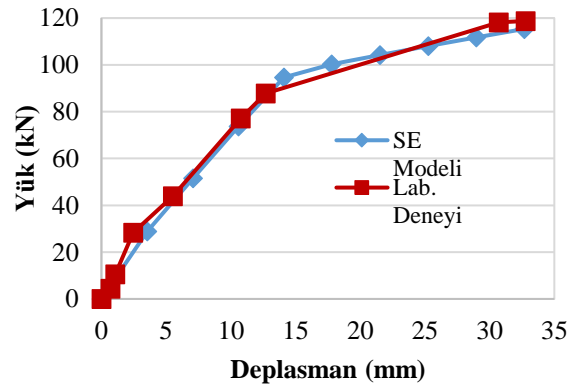
modülü ve çekme dayanımı değerleri sırası ile 213500 ve 3900 MPa verilmiştir (2004). Modelde epoksi elemanı dikkate alınmadığından, ASTM D7522 Standardına göre YTÜ Yapı laboratuvarında yapılan sıyırılma deneylerden elde edilen Şekil 3'deki grafiğe göre 7 katlı CFRP sistem için çekme dayanımı (1) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_{\epsilon} = 7000/7850 = 0,892 \text{ MPa} \quad (1)$$

Elastisite modülü ise Şekil 3'deki grafiğin eğiminden 44.583 MPa olarak hesaplanmıştır. CFRP sistem için izotropik malzeme tanımı yapıp deneylerden elde edilen Elastisite modülü ve çekme dayanımı değerleri programa tanımlanmıştır.

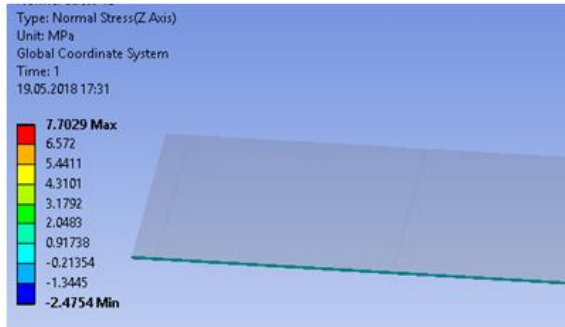
## Deneyel Çalışma ile Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için, Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarından referans alınan S3b isimli kirişe ait açıklık ortası yer değiştirme ve göçme yükü değerleri üç boyutlu üretilen ANSYS modelinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar testi sonuçlarında açıklık ortasında ölçülen yer değiştirme değeri 32 mm ve göçme anındaki yük değeri 118 kN elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarında ise açıklık ortasındaki yer değiştirme 32 mm iken kiriş üzerindeki toplam yük değeri 115 kN hesaplanmıştır. Şekil 12'de elde edilen yük-deplasman eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 12. ANSYS modelin ve Pham araştırmacısının yük - deplasman eğrisi

CFRP sistemin Z eksenindeki (malzemeye dik doğrultuda çekmeye çalışan eksen) gerilme dağılımı Şekil 13'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen gerilme değerlerinin, ASTM D7522 standardına göre yapılan CFRP sisteme ait deneyde bulunan kopma dayanım (0,892 MPa) değerini aştığı tespit edilmiştir. Ayrıca eğilme testi sonucu hasar görmüş kiriş incelendiğinde CFRP sistemin beton yüzeyden tamamen ayrıldığı aynen analiz sonuçlarından elde edildiği gibi görülmektedir (Şekil 14).



Şekil 13. CFRP sistemin Z eksenindeki gerilme dağılımı

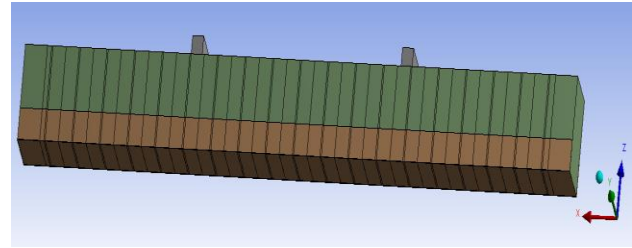


Şekil 14. S3b beton kirişinde CFRP kopma bölgesi

#### Parametrik Sonlu Eleman Analizleri

Analizde referans alınan S3b kirişi geometrik özellikleri ve malzeme karakteristik değerleri sabit tutularak, CFRP sistemin kullanım durumuna göre gruplandırılmış ve parametrik olarak irdelenmiştir. Betonun alt yüzeyindeki CFRP malzemenin genişliğine, kat adedine ve

kirişin yan yüzeylerini sarmasına bağlı olarak sırasıyla B1, B2 ve B3 şeklinde gruplar oluşturulmuştur. G sembolü CFRP'nin kiriş alt yüzeyindeki genişliğini göstermektedir ve bu genişlik analizlerde 80, 100 ve 140 mm değerler almaktadır. K sembolüyle gösterilen kirişler CFRP sisteminin oluşturulan karbon fiber liflerin kaç katlı olarak kullanıldığını ifade etmektedir ve kat sayısı 2, 3 ve 4 olarak alınmıştır. H sembolüyle gösterilen kirişler ise betonarme kirişin alt yüzünün tamamının kaplı ve ön ve arka yan yüzeylerinin belirli bir yüksekliğinin CFRP ile güçlendirildiğini göstermektedir. Tablo 1'de farklı kiriş modellerine ait ayrıntılar verilmiştir. Şekil 15'de B3H86 kirişine ait sonlu elemanlar modeli yer almaktadır.



Şekil 15. B3H86 kirişine ait SE modeli

Tablo 1. Kirişlerin adlandırılması

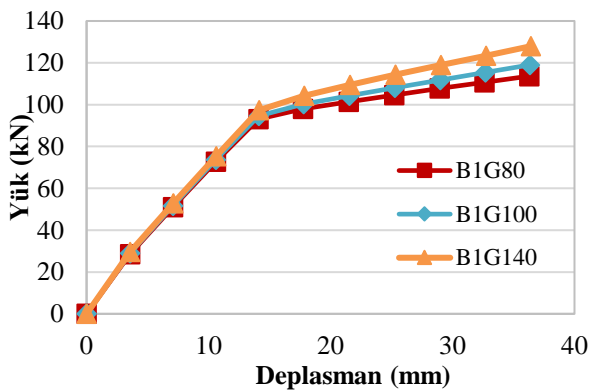
Kiriş Adı	Açıklaması
B1G80	80 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B1G100	100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B1G140	140 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K2	2 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K3	3 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K4	4 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B3H86	Yan yüzeyleri 86 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş
B3H130	Yan yüzeyleri 130 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş
B3H172	Yan yüzeyleri 172 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş

Parametrik sonlu eleman analizleri ANSYS SE programı ile yapılmıştır. CFRP sisteminin kiriş

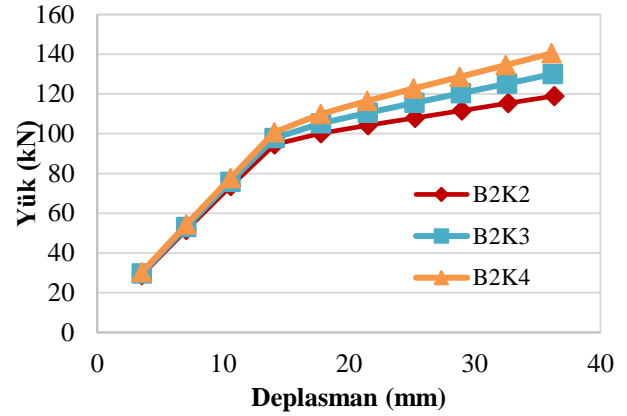
tabanındaki genişliğinin arttırılması, betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. B1G80 isimli kirişin CFRP sistem genişliği referans kirişe göre 20 mm kısa olduğundan yük taşıma kapasitesinin %5 azaldığı görülmektedir. B1G140 kirişinde ise yük taşıma kapasitesinin %7 arttığı Şekil 16'de verilmiştir.

Kirişin yük taşıma kapasitesi ile CFRP sistemdeki karbon fiber liflerin kat adedi arasında da analizler sonunda doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir. Referans kirişte uygulanan CFRP sistem 2 kat karbon fiber lif içermektedir. Üç katlı life sahip B2K3 kirişinde yük artışı %6 ve dört katlı B2K4 kirişinde yük artışı %16,5 olmuştur (Şekil 17).

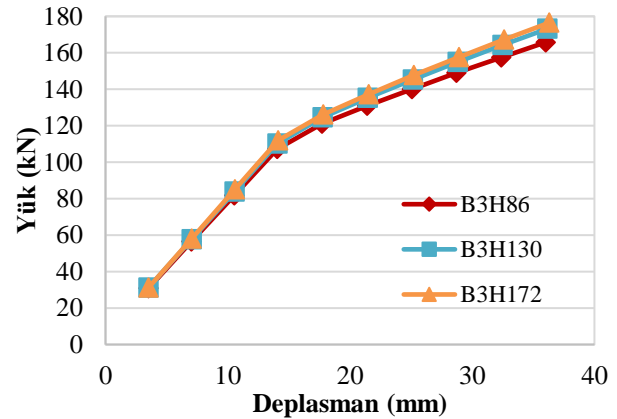
Kirişin yan yüzeylerinin CFRP ile sarılması durumunda, kirişin sadece alt yüzeyinin güçlendirildiği referans kirişe göre yük taşıma kapasitesinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 18). Yan yüzeylerdeki CFRP sistem uygulama yüksekliğinin 86 mm olduğu B3H86 kirişinde yük taşıma kapasitesi %27 oranında artmıştır. CFRP yüksekliğinin 130 mm olduğu (B3H130) durumda %33 ve yüksekliğin 172 mm olduğu B3H172 kirişinde ise %36 oranında taşıma kapasitesi artmıştır.



Şekil 16. CFRP genişliklerine göre yük - deplasman grafiği



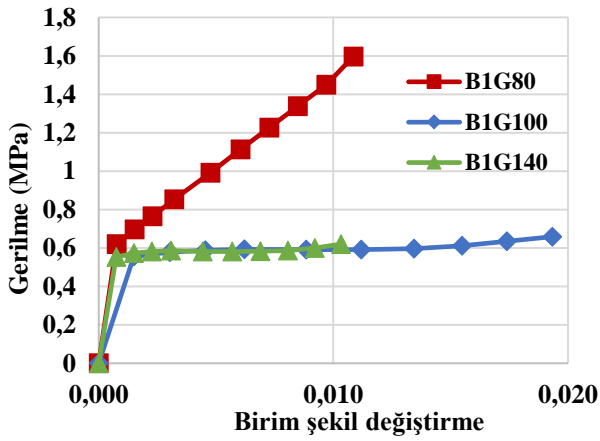
Şekil 17. CFRP kat adedine göre yük - deplasman grafiği



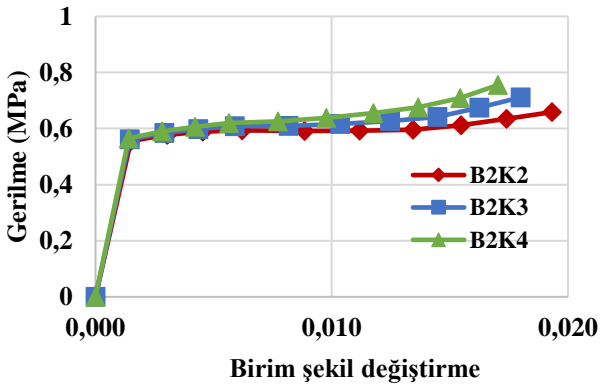
Şekil 18. CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre yük - deplasman grafiği

Ayrıca, tüm parametrik analizlerde beton kirişin çekme bölgesinde beton lifler üzerinde oluşan gerilme - birim şekil değiştirme değerleri zamana bağlı olarak dikkate alınmıştır (Şekil 19-21). Birim şekil değiştirme değeri, elastik ve plastik birim şekil değiştirme değerlerinin toplamı şeklinde hesaplanmıştır.

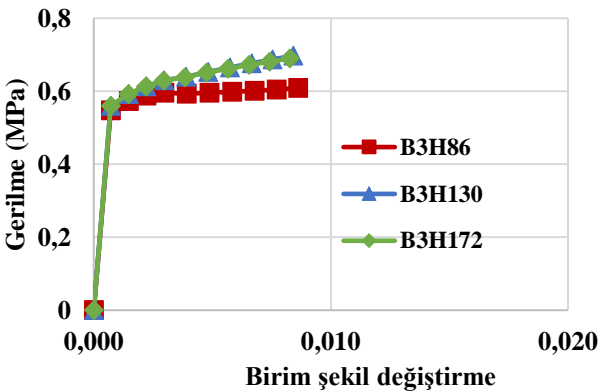
Çekme bölgesinde incelenen beton elemanda aynı gerilme altında birim şekil değiştirme değerlerinin CFRP genişliğinin artması durumunda arttığı görülmüştür (Şekil 19). Beton birim şekil değiştirme değerleri, CFRP kat adedi ve betonun yan yüzeylerini sardığı yükseklik değerleri arttıkça azalmaktadır (Şekil 20-21).



Şekil 19. CFRP genişliklerine göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 20. CFRP kat adedine göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 21. CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

ACI 440'a (Amerika Beton Enstitüsü) göre beton maksimum birim şekil değiştirme değerine ulaşmadan FRP'deki birim şekil değiştirme maksimum değere ulaşırsa,  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ , FRP kopması meydana gelir. FRP'nin kopma birim uzaması (2) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} \quad (2)$$

Eşitlikte  $f_{fu}$  FRP'nin maksimum çekme dayanımını,  $E_f$ 'de FRP'nin Elastisite modülünü temsil etmektedir.

Eğer betonarme sistem FRP'ye gelen yükleri karşılayamazsa, FRP sıyrılması meydana gelebilir. Bu göçme durumunu engellemek için (3) eşitliği ile FRP'deki etkili birim şekil değiştirme, sıyrılmanın meydana geldiği birim şekil değiştirme düzeyi ile sınırlandırılır.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

Burada,  $f_c$  betonun basınç dayanımını,  $n$  FRP kat adedini ve  $t_f$  de FRP kumaş/plaka kalınlığını ifade etmektedir.

Çözümlemesi yapılan kirişlerde maksimum yük altında (göçme anında) CFRP birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Tablo 2'de sonlu elemanlar analizden elde edilen değerler ACI 440'a göre hesaplanan kopma ve sıyrılma birim şekil değiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. CFRP genişliği ve kat adedi arttıkça analizden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri azalmaktadır. Fakat, CFRP'nin betonun yan yüzlerini sardığı durumlarda yan yüzlerdeki CFRP yüksekliği arttıkça birim şekil değiştirme değerleri arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır. Tüm kiriş gruplarında birim şekil değiştirme değerleri, eşitlik (2) ile hesaplanan kopma birim uzama sınır değerini aşmaktadır. Bu da CFRP sistemin beton alt yüzeyinden test sonucunda koptuğunu göstermiştir (Şekil 14).



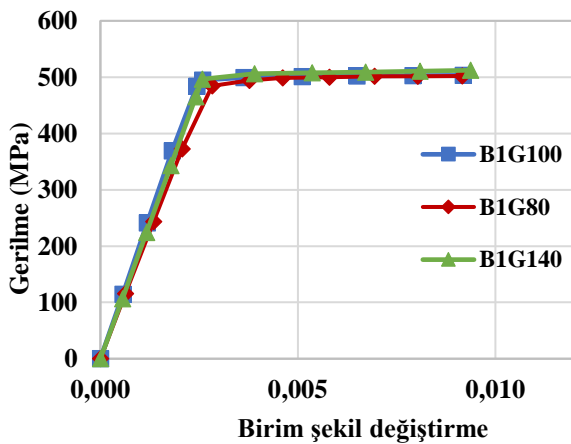
Tablo 2. CFRP birim şekil değiştirme değerleri

Kiriş Adı	ANSYS	ACI 440 (Sıyrılma)	Kopma birim uzaması
B1G80	0,0119	0,0153	0,00002
B1G100	0,0118	0,0153	0,00002
B1G140	0,0111	0,0153	0,00002
B2K2	0,0119	0,0153	0,00002
B2K3	0,0109	0,0125	0,00002
B2K4	0,0104	0,0109	0,00002
B3H86	0,0333	0,0153	0,00002
B3H130	0,0378	0,0153	0,00002
B3H172	0,0327	0,0153	0,00002

Tablo 3. Donatıdaki gerilme değerleri

Kiriş Adı	Referans Yük (kN)	Donatıdaki gerilme (MPa)
B1G80	110	478
B1G100	110	454
B1G140	110	399
B2K2	115	483
B2K3	115	436
B2K4	115	413
B3H86	123.4	411
B3H130	123.4	406
B3H172	123.4	405

Parametrik analizlerde incelenen durumlardan bir diğeri ise çekme bölgesindeki boyuna donatının davranışını içermektedir. Bu amaçla donatıdaki gerilme-şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre boyuna donatıdaki maksimum gerilme değeri akma sınırını (504 MPa) aşmıştır (Şekil 22). Referans alınan kirişin yük taşıma kapasitesi sabit alınarak boyuna donatıdaki gerilmeler tüm farklı kiriş grupları için incelenmiştir (Tablo 3). Analizler sonucunda, CFRP genişliğinin, kat adedinin ve yan yüzeylerdeki uygulama yüksekliğinin artması durumlarında donatıdaki gerilmelerin azaldığı ve akma dayanımına daha geç ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 22. Boyuna donatıdaki gerilme-şekil değiştirme

## Sonuçlar

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak literatürde mevcut olan bir deneysel çalışma referans alınmış ve yük deplasman eğrisi elde edilmiştir. Referans kirişte elde edilen deney sonuçlarında kirişin göçme anındaki yükü 120,45 kN, SE modelinde bulunan değer 115 kN çıkmıştır. Sonuçlar SE modelinin doğruluğunu göstermektedir.

Mevcut SE modelinin, CFRP sistemin farklı kullanım durumuna göre doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiş ve kirişlerin yapısal davranışları irdelenmiştir. Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda, kiriş alt yüzeyine uygulanan CFRP sistemin genişliğinin, kat adedinin artırılması veya kiriş yan yüzeylerinin de CFRP ile sarılması durumlarında kiriş göçme yükünde artış görülmüştür.

Boyuna donatıdaki gerilmeler incelendiğinde, CFRP sistemin genişliğinin, kat adedinin artırılması veya kiriş yan yüzeylerde uygulanan CFRP yüksekliğinin artması durumlarında donatının akma dayanımına daha geç ulaştığı ve CFRP malzemenin çekme etkisine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum betonarme kirişin sünekliliğinin azaldığını göstermektedir.

Analizleri gerçekleştirilen kirişlerde CFRP genişliğinin ve kat adedinin artması durumunda, maksimum yükleme anında CFRP sistemde

oluşan birim şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerler azalmakta fakat ACI440'a göre hesaplanan kopma birim uzama sınır değerini aşmaktadır. Böylece CFRP sistemin betonarme kirişin alt yüzeyinden ayrıldığı araştırmacıların yaptıkları deneysel çalışmalar ile de tespit edilmiştir.

Ayrıca betonarme kirişin çekme bölgesindeki beton lifte oluşan gerilme - birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Aynı birim şekil değiştirme değerinde CFRP genişliğinin artması durumunda betondaki çekme gerilmesi değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kat adedinin ve yan yüzeylerde uygulanan CFRP yüksekliğinin artması durumunda çekme gerilmesi değerinin arttığı görülmüştür. Bu değerlerin maksimum çekme kapasitesini aştığı, kirişin çatladığı ve hatta parça kopmaları meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum deneysel sonuçlar ile uyum göstermiştir.

Bu çalışmada CFRP sistem bir bütün olarak modellenmiş ve epoksi yapıştırıcı ayrı bir malzeme olarak SE modellerinde dikkate alınmamıştır. Çalışmanın devamında epoksi malzemesi ayrı olarak tanımlanabilir ve sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılabilir. Ayrıca karbon lif katman sayısı artırılarak standarda uygun olacak şekilde hem sıyırılma testi tekrarlanmalı, hem de SE modelleri yenilenerek katman sayısındaki artışın kirişlere etkileri incelenmelidir.

## Kaynaklar

- ACI 440, (2008). Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures, *American Concrete Institute Committee 440*, Miami.
- Alsayed, S.H., (1998). Flexural behaviour of concrete beams reinforced with gfrp bars, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 1-11.
- ASTM D7522 /D7522M, (2015). Standard test method for pull-off strength for frp laminate systems bonded to concrete substrate, *ASTM Standardı*, West Conchohocken.
- Bousias, S.N., Triantafillou, T.C., Fardis, M.N., Spathis, L., O'Regan, B.A., (2004). Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without

- corrosion, *ACI Structural Journal*, **101**(4), 512-520.
- Büyüköztürk, O., Güneş O., Karaca E., (2003). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, *Construction and Building Materials Dergisi*, **18**, 9-19, Cambridge.
- Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, Ş.M., (2004). Betonarme kirişlerin lifli polimer (frp) malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10**, 291-298.
- Gheorghiu, C., Labossiere, P., Proulx, J., (2007). Response of cfrp-strengthened beams under fatigue with different load amplitudes, *Construction and Building Materials*, **21**, 756-63.
- Iacobucci, R.D., Sheikh, S.A., Bayrak, O., (2003). Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance, *ACI Structural Journal*, **100**, 6, 785-794.
- Jianzhuang, X., Li, J., Quanfan, Z., (2004). Experimental study on bond behaviour between FRP and concrete, *Construction and Building Materials*, **18**, 745-52.
- Khalifa, A., Nanni, A., (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites*, **22**, 165-74.
- Lee, H.K., Hausmann, L.R., (2004). Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP, *Composite Structures*, **63**, 201-9.
- Masoud, S., Soudki, K., (2006). Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams, *Cement and Concrete Composites*, **28**, 969-77.
- Ozcan, O., Binici, B., Ozcebe, G., (2008). Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers, *Engineering Structures*, **30**, 1632-1646.
- Pham H., Al-Mahaidi R., (2004). Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites, *Composite Structures*, **66**, 617-625.
- Pitilakis, K., (2018). Recent advances in earthquake engineering in Europe, Springer, Thessaloniki.
- Rabinovitch, O., (2005). Bending behaviour of reinforced concrete beams strengthened with composite materials using inelastic and nonlinear adhesives, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **10**, 1580-92.
- Sause, R., Harries, K.A., Walkup, S.L., Pessiki, S., Ricles, J.M., (2004). Flexural behavior of

- concrete columns retrofitted with carbon fiber reinforced polymer jackets, *ACI Structural Journal*, **101**, 708-716.
- Sayın, B., Manisalı, E., (2009). Lif takviyeli plastik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **16**,1, 63-75.
- Seible F., Priestley M.J.N., Hegemier G.A., Innamorato D., (1997). Seismic retrofitting of RC columns with continuous carbon fiber jackets, *Journal of Composites for Construction*, **1**, 52-62.
- Sheikh SA, Yau G., (2002). Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers, *ACI Structural Journal*, **99**, 72-80.
- Xiao Y, Ma R., (1997). Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing, *Journal of Structural Engineering*, **123**, 1356-1364.
- Yang, J., Ye, J., Niu, Z0., (2008). Simplified solutions for the stress transfer in concrete beams bonded with FRP plates, *Engineering Structures*, **30**, 533-45.

---

DowAska Hayat Kurtaran Güçlendirme Teknolojisi.  
<http://www.dowaksa.com/dowaksa-hayat-kurtaran-yapi-guclendirme-teknolojisini-yalovada-gerceklestirdigi-deprem-simulasyonunda-basariyla-sergiledi>. Erişim tarihi Mayıs 2, 2018.

## Modeling and analysis of strengthened reinforced concrete beams with CFRP by finite element method

### Extended abstract

*In Turkey, structural elements are strengthened with fiber polymer (LP) that causes a considerable increase in load bearing capacity and ductility system in order to exemplify a necessary and sufficient performance under lateral loads. In this study, nonlinear analyses of reinforced concrete beams retrofitted with LP material are performed by using nonlinear finite element (FE) method. Considering the laboratory tests done by Pham and Al-Mahaidi, finite element models of the beams are created in the ANSYS program. The mechanical properties of the CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) material used in the experimental studies in the literature have been tested in accordance with ASTM D7522 standards. According to the results of the laboratory experiment, the CFRP system was modeled mathematically and reinforced concrete beams were analyzed under static loads. The load-displacement curve results obtained from the FE analyses and the experimental data showed good match.*

*After verification of the FE model, some parametric studies were investigated to evaluate the behavior of the reinforced concrete beams with CFRP materials. CFRP width along the bottom side of the beams, the number of layers in the CFRP system and the height of the materials applied along the front and back surfaces of the beams were varied in the analyses. Load capacity, the maximum stress-strain curve results on the concrete fibers along the bottom side of the beams, strain values on the CFRP system under the maximum load and the stress-strain values along the longitudinal reinforcement were obtained from the FE parametric analyses. The results showed that when the CFRP width increases the load capacity of the beam increases. Models indicates that if the CFRP layers are increased the load capacities are enhanced up to 6% and 16.5% on the beams with 3 layers and 4 layers, respectively. In the beams with CFRP systems along the front and back surfaces, the load capacities are improved by 27%, 33% and 36% when the CFRP heights on the surfaces are 86 mm, 130 mm, and 172 mm., respectively.*

*Stress-strain curves obtained from the FE analyses reveals that the concrete strain values on the tension*

*side of the beams are increased by the increment on the width of the CFRP system. Although, the strain values on concrete fibers are decreased with the increase in CFRP layers and the height along the surfaces.*

*In the FE models, the CFRP strain values are determined under the maximum load and compared with the values according to ACI 440 standard. The results indicates that the strain values are well beyond the fracture strain limit. Therefore, the CFRP system were ruptured from the bottom face of the beam as obtained during the laboratory testing.*

*The stress-strain curves of the longitudinal reinforcement are evaluated for each parametric analyses. The stress values are decreased by the increase in the CFRP width, number of layers and the CFRP height along the faces. This case showed that the CFRP system contributed to the tension capacity of the beams and the ductility of the beams were decreased.*

**Keywords:** *Finite element method, fiber reinforced polymer, strengthening, pull-off test.*



## Dicle Nehri'nin taşkın analizinin HEC-RAS programı ile yapılması

**Selman OĞRAŞ**

DSİ 10. Bölge Müdürlüğü, Diyarbakır

[ugras\\_selman@hotmail.com](mailto:ugras_selman@hotmail.com) ORCID: 0000-0002-0347-3482

**Fevzi ÖNEN\***

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır

[fonen@dicle.edu.tr](mailto:fonen@dicle.edu.tr) ORCID:0000-0002-2368-1035, Tel: (412) 241 10 00 (3541)

Geliş: 29.12.2018 Revizyon: 22.01.2019, Kabul Tarihi: 15.02.2019

### Öz

Taşkınlar, tropikal iklim kuşağında yer alan ülkeler ve Türkiye gibi bu iklim kuşağında yer almayan ülkelerde de hem nicelik olarak hem de verdiği zararlar açısından bir artış eğilimindedir. Türkiye'de coğrafi yapı çok karmaşık ve kısa mesafelerde dahi değişiklik gösterdiğinden oluşan taşkınların şekil ve etkileri de bölgeden bölgeye farklılık göstermektedir. Doğanın kendine özgü durumu göz önüne alındığında, depremden sonra en büyük felaket olan taşkınların meydana gelme ihtimali oldukça düşüktür. Ancak; nüfus artışı, yanlış imar ve plansız mühendislik uygulamaları sonucunda taşkınlar insanoğlu için her geçen gün daha riskli hale gelmektedir. Taşkınlardan oluşan zararları azaltmak için alınacak önlemlerin başında ıslah çalışmaları gelmektedir. Bu çalışmaların yapılabilmesi için akarsular üzerindeki köprü ve regülatör gibi hidrolik yapıların akarsu en kesitlerinde meydana getirdiği değişiklikler ile arazinin doğal durumundan dolayı kesitlerde meydana gelen değişimlerin su yüzü profiline etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Su yüzü profiline belirlenebilmesi için hesap ve analiz kolaylığı sağlayan paket programlar geliştirilmiştir. HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers - River Analysis System) bunlardan bir tanesidir. Bu çalışmada Dicle Nehri'nin Diyarbakır- Silvan karayolu ile tarihi On Gözlü Köprü arasındaki kesimde HEC-RAS ile taşkın analizi yapılmıştır. Dicle Nehri üzerindeki köprüler gibi hidrolik yapıların neden olduğu kesit değişimleri, ayrıca mevcut doğal kesit değişimlerinin de akıma etkisini tespit etmekle beraber oluşabilecek taşkın yayılım alanlarının güzergah üzerinde bulunan özel işletmelere ait tesisler, Dicle Üniversitesi yerleşkinde bulunan üniversiteye ait tesisler ve hastaneler, kısmi de olsa yerleşim alanları, turizm açısından önemli konuma sahip Tarihi On Gözlü Köprü (Dicle köprüsü) ile UNESCO Dünya Kültür Mirası Listesinde yer alan Hevsel Bahçeleri, bunların yanı sıra sonraki yıllarda yapılması düşünülen Dicle Vadisi projesine olası etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Çalışma yapılan bölgeye ait 1/1000'lik haritalar AutoCAD Civil 3D programı kullanılarak sayısallaştırılmış ve bölgenin sayısal yükseklik modelleri elde edilerek en kesitler elde edilmiştir. Elde edilen en kesitler HEC-RAS programına tanımlanarak taşkın yatağının hidrolik karakteristikleri ve  $Q_{25}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{500}$  taşkın tekerrür debilerinin su yüzü profilleri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Dicle Nehri, Taşkın Analizi, HEC-RAS

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Taşkın; bir akarsuda normalin üstünde akım ve seviye yükselmesi sonucunda normalde su altında kalmayan alanların sular altında kalmasına sebep olarak tanımlanabilir. Dünyada birçok bölgede doğal afet sonucu meydana gelen hasarların başlıca nedenleri arasında taşkınlar gelmektedir. Taşkınların can, mal kaybına ve ekonomik faaliyetlerin aksamasına bağlı olarak ekonomik kayıplara verdiği zararlar çok büyüktür. Köprülerin, menfez suyollarının, barajların dökülme yerlerinin tasarımında taşkın büyüklükleri önem arz eder (Bagatur ve Onen, 2018). Taşkın olaylarının değerlendirilmesi mühendislik projelerinin planlanması ve tasarımı için gereklidir. Bir barajın planlanmasında, hem memba hem de mansap koşullar için taşkın sorunları dikkate alınmalıdır (Bagatur ve Hamidi, 2014). Akarsu taşkınları, yukarı havzaya düşen ani ve yoğun yağışların veya ani eriyen kar kütlelerinin yüzeyde akışa geçmesiyle oluşurken bunun dışında dalgalanmalara bağlı olarak kıyı taşkınları da oluşmaktadır (Şekil 1). Baraj, Regülatör gibi hidrolik yapılarda meydana gelen arızalar ve yıkılmalardan sonra oluşan taşkınlar, Drenaj sistemlerinin yeterli oranda çalışmaması sebebiyle ani yağış ve fırtına durumlarında uzun süreli yeraltı suyu birikmelerinden kaynaklanan taşkınlar olmak üzere farklı taşkın türlerinden söz edilebilir (Onuşluel, 2005).



Şekil 1. Aşırı Dalgalanma Sonucu Oluşan Kıyı Taşkın Örneği

Ülkemizde yaşanan taşkınları sadece coğrafi yapı farklılıkları ve yağışların düzensizliğine bağlamak doğru olmayacaktır. Doğal riskler arasında yer alan ve geçmişte olduğu gibi gelecekte de önemini koruyacak olan taşkınlar, büyük oranlarda can ve mal kaybına neden olmasının arkasında yatan en önemli neden kentsel gelişmenin biçimidir. Bu bağlamda, göç ve nüfus artışı baskısı altında çoğu kez çok hızlı bir biçimde büyüyen kentlerimiz, her türlü risk faktörünün felakete dönüşmesini kolaylaştırmaktadır (Hakan, 2007).

Meteoroloji Genel Müdürlük verilerine göre 1967-1987 yılları arasında taşkınların oranı %33 iken 1998-2008 yılları arasında yapılan ıslah çalışmaları, inşa edilen baraj, regülatör gibi hidrolik yapılar nedeniyle bu oran %14'e kadar gerilemiş olsa da hızlı değişen iklim koşulları, düzensiz yapılaşma gibi nedenlerle bu çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Türkiye genelinde DSİ verilerine göre 1975-2015 yılları arasında meydana gelen 1209 adet taşkın olayında 720 can kaybı ve 893933 hektar tarım arazisi taşkına maruz kalmıştır (Tablo 1).

Dicle Havzasında Diyarbakır, Batman, Siirt, Mardin ve Şırnak illeri yer almaktadır. Bu havzada Dicle Nehri, Botan Çayı, Batman Çayı yer almakla beraber Bitlis Deresi ve Habur Irmağı da önemli kollar olarak havzanın can damarlarıdır. Diyarbakır, Batman ve Cizre'ye kadar uzanan Dicle Nehri yatağı taşkın bölgesidir. Özellikle 2006 yılı sonbaharında başta Diyarbakır ve Batman olmak üzere Cizre, Mardin ve Şırnak İllerinde meydana gelen taşkınlarda 41 vatandaş hayatını kaybederken tarım arazileri ve işyerleri sular altında kalmış yüzlerce ev kullanılamaz hale gelmiştir. Batman şehir merkezinde 16 mm yüksekliğinde ve 15 dakika süren yağış süresinde oluşan taşkında 10 vatandaş hayatını kaybederken 13 vatandaş da yaralanmıştır. Ayrıca telef olan küçük ve büyükbaş hayvanlar ile bina, ahır ve işyerlerinde zararlar meydana gelmiştir (Şekil 2-3).

**Tablo 1.** Türkiye 'de 1975-2015 Yılları Arasında Meydana Gelen Taşkınlar (Oğraş, 2018)

Yıllar	Taşkın Sayısı	Can Kaybı	Su Altında Kalan Alan (ha)
1975	62	8	36 714
1976	29	5	22 536
1977	27	11	3 317
1978	21	0	13 850
1979	21	61	40 966
1980	44	6	83 016
1981	16	2	58 413
1982	10	0	784
1983	14	33	2 113
1984	12	0	29 140
1985	7	0	2 318
1986	8	4	679
1987	7	0	564
1988	24	17	3 910
1989	10	1	9 500
1990	26	57	7 450
1991	23	23	15 770
1992	14	1	690
1993	2	0	60
1994	9	4	1 680
1995	20	164	201 100
1996	4	1	11 000
1997	1	0	1 390
1998	2	57	7 000
1999	1	3	0
2000	4	0	8 066
2001	42	8	43 297
2002	27	27	510
2003	21	7	64 200
2004	23	3	25 750
2005	25	14	13 855
2006	24	45	85 810
2007	22	11	1 050
2008	10	2	10
2009	84	59	3 250
2010	110	25	44 279
2011	56	13	202
2012	69	23	19 685
2013	38	7	17 569
2014	118	9	4 455
2015	122	9	7 985
<b>GENEL TOPLAM</b>	1209	720	893 933



Şekil 2. Batman, Merkez-Taşkın (DSİ, 2006)



Şekil 3. Diyarbakır, Çınar -Taşkın (DSİ, 2006)

Taşkın kontrolü ve analizi için kullanılan yöntemlerin çoğu on yıl öncesine kadar teknolojiden uzak emek gerektiren yöntemlerken son yıllarda hazır paket programlar kullanılmaya başlanmıştır (Onuşlu, 2005). Amerika Birleşik Devletler Askeri Mühendislik Birimince geliştirilen HEC-RAS, Danimarka Hidrolojik Enstitüsü (DHI) tarafından geliştirilen MIKE 11-DHI gibi programlar, akarsular üzerinde bulunan hidrolik yapıların veya güzergahtaki değişimlerin meydana getireceği su yüzü profil değişimlerini belirlemek, taşkın seviyelerinin belirlenmesi gibi etkenleri göz önüne alarak hidrolik yapıların tasarımında kullanılmaktadır.

Yurtal, ve Ark. (2003), Seyhan Regülatörü ile bu nehir üzerinde bulunan farklı tip ve kesitlerdeki köprülerin meydana getirdiği kabarmalar ile bunların su yüzü profil hesaplarını HEC-RAS ile modelleyerek elde ettikleri sonuçları DSİ tarafından 1980 yılında aynı nehir üzerindeki Taş Köprü ve Girne Köprüsü membasında hesaplanan kabarma değerleri ile karşılaştırmışlardır. Düden (2010), Barajların kısmi ve tedrici yıkılması gerçeğini göz önüne alarak genel taşkın sonucu Darıdere Barajının yıkılmasını modelleyerek taşkın sonrası ortaya çıkan su yüzü profilini HEC-RAS programını kullanarak belirlemiştir. Özdemir (2007),

Havran Çayı'nda CBS tabanlı taşkın analizi yapılarak CBS içinde yer alan HEC Geo RAS programıyla üretilen taşkın modellerine ait derinlik hesaplaması ve mekânsal dağılımı haritalanabilirken taşkın sularına ait hız ve katı madde (sediment) miktarlarının mekânsal haritalaması için yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Efe (2014), HEC-RAS paket programı yardımıyla büyük debilere sahip ve zaman zaman can ve mal kayıplarına da neden olan Batman İli sınırından geçen Batman Çayının taşkın analizini yapmış ve DSİ tarafından yürütülmüş olan Batman Çayı Islahı yapım işi kapsamında belirlenen kesitin yeterli olacağı sonucuna varmıştır. Yaylak (2016), HEC-RAS programını kullanarak zaman zaman büyük debilere ulaşabilen ve bu nedenle can mal kayıplarına neden olan Bitlis Çayının düzensiz kentleşmeye sahip Bitlis İline olan taşkın etkisini Coğrafi Bilgi Sistemini (CBS) de kullanarak tespit etmeye çalışmıştır.

Bu çalışmada da HEC-RAS programıyla Dicle Nehri üzerindeki köprüler ve bu hidrolik yapıların neden olduğu kesit değişimleri, ayrıca mevcut doğal kesit değişimlerinin de akıma etkisini tespit etmekle beraber oluşabilecek taşkın yayılım alanlarının güzergah üzerinde bulunan Orman İşletmelerine bağlı Fidanlık Koruma yerleşkesi, kültür balıkçılığı üretme ve



meyvecilik geliştirme tesisleri, Dicle Üniversitesi yerleşkesinde bulunan üniversiteye bağlı tesisler ve hastaneler, kısmi de olsa yerleşim alanları, turizm açısından önemli konuma sahip Tarihi On Gözlü Köprü (Dicle köprüsü) ile UNESCO Dünya Kültür Mirası Listesinde olan Hevsel Bahçelerine olası etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

Dicle Nehri, Türkiye'nin Fırat Nehri'nden sonra ikinci büyük nehridir. Diyarbakır, Batman, Bitlis, Siirt, Şırnak ve Hakkari illerini sınırları içine alan Dicle Nehri, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Fırat Havzası ile Dicle Havzasının yağışlı alanlarını ayıran Karacadağ'ın doğusunda yer almaktadır. Dicle Nehri'nin toplam uzunluğu tüm yatak 1900 km ve Hazar Gölü-Irak sınırı ülkemiz sınırlarındaki uzunluğu 573 km dir. Hazar Gölü'nün yakınlarında yükseltisi 1248 m ve sınırlarımızı terk ettiği yerdeki yükseltisi yaklaşık olarak 320 m olmaktadır. Dicle Havzası üzerinde altı geliştirme projesi planlanmıştır. Dicle Nehri ana kolu üzerinde planlanmış dört barajdan Kralkızı ve Dicle barajları tamamlanmış, Ilısu barajı bitme aşamasında ve Cizre barajı proje aşamasındadır. Ana kolun yanı sıra, Batman çayı üzerindeki Batman barajı tamamlanmış, Silvan barajı %50 seviyesinde inşaatı devam etmekte, Garzan çayı üzerinde de Garzan barajı tamamlanmıştır.

## Çalışma Alanı ve Karakteristik Veriler

Çalışma alanı olarak Diyarbakır Silvan İlçesi yolu üzerinde bulunan Sadi Köprüsü ile Tarihi On Gözlü Köprüsü (Dicle Köprüsü) arasında kalan 10 km'lik kısım ele alınmıştır. Düşük bir eğimle geniş bir vadide akan Dicle nehri ova akarsular niteliği taşıdığı için nehir boyunca yerleşim yerleri ve verimli tarım arazileri mevcuttur. DSİ 10. Bölge Müdürlüğü tarafından Dicle Nehri üzerinde bulunan 34 yıllık AGİ İstasyonu günlük maksimum akım dağılımlarının SMİRNOV- KOLMOGOROV testine göre tekerrür debi sonuçları 500 yıllık yineleme dönemi taşkın debisi 5450,71 m<sup>3</sup>/s, 100 yıllık yineleme dönemi 3871,25 m<sup>3</sup>/s, 50

yıllık yineleme dönemi 3209,47 m<sup>3</sup>/s, 25 yıllık yineleme dönemi de 2598,18 m<sup>3</sup>/s olarak hesaplanmıştır.

Su yüzü profillerini doğru olarak elde etmede “n” pürüzlülük katsayısı önemli rol oynamaktadır. Bu değer birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak su yüzü profili bilgileri belli ise “n” değerinin daha hassas ayarlanması gerekir. Eğer belirli bir veri yoksa o durumlarda deneyler sonucu elde edilen yaklaşık “n” değerleri kullanılabilir. Birçok farklı kanal şekli için kullanıcının yararlanacağı birçok referans “n” değerleri vardır. Ancak hazırlanmış çizelgelerden alınan veriler kullanıldığında öngörülen hızlar ile gerçek akım hızları arasında önemli farklar olduğu da görülmüştür (Chow, 1959). Bu nedenle çizelgedeki verilerin yanında çalışma yapılacak alanda çekilmiş fotoğraflar karşılaştırılarak ayrıca amprik/fiziksel bağıntılar kullanılarak ve Cowan tarafından geliştirilmiş yöntem kullanılarak daha etkili bir sonuca ulaşılabilir (Cowan, 1956). Bu Denklem;

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (1)$$

Burada, n<sub>b</sub>=düzgün kanalların içerdiği doğal malzeme değeri, n<sub>1</sub>=yüzey düzensizlikleri göz önüne alınarak kullanılan değer, n<sub>2</sub>=kanalın şekli ve kesit değişimleri için kullanılan değer, n<sub>3</sub>=kanallardaki engeller için kullanılan değer, n<sub>4</sub>=kanallardaki bitki örtüsü için kullanılan değer, m=kanalın menderesini hesaba katacak düzeltme faktörüdür. Dere yataklarında doğal veya ıslahlı durumlar için pürüzlülük katsayısı hesaplanırken kullanılan “Cowan” metodunun ülkemiz dere yatakları için en uygun yöntem olduğu DSİ tarafından değerlendirilmektedir (Efe ve Onen, 2015).


Bu çalışmada Dicle Nehri doğal durum tahkiklerinde güzergahta çekilen fotoğraflar ve yapılan gözlemler sonucunda göre aşağıda belirtilen kilometreler arasında 2 farklı pürüzlülük katsayısı hesaplanmıştır (Tablo 2). Tablo 3'de 2.KISIM Km (6+000~10+000) Kanaldaki Bitki Örtüsüne Bağlı Katsayı tablosu verilmiştir.

**Tablo 2.** Dicle Nehri Doğal Durum Pürüzlülük Katsayısı Hesabı

KATSAYI	0+ 000.00~ 6+ 000.00 km'ler arası	6+ 000.00~ 10+ 200.00 km'ler arası
$n_0$	0.028	0.028
$n_1$	0.005	0.020
$n_2$	0.000	0.005
$n_3$	0.000	0.000
$n_4$	0.040	0.045
$m$	1.150	1.150
$n = m(n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$	<b>0.08395</b>	<b>0.1127</b>

**Tablo 3.** Kanaldaki Bitki Örtüsüne Bağlı Pürüzlülük Katsayısı

BİTKİ ÖRTÜSÜ	Düşük	$n_4$	0.005 - 0.010
	Orta		0.010 - 0.025
	Yüksek		0.025 - 0.050
	Çok Yüksek		0.050 - 0.100
Kanaldaki bitki örtüsü düzeyi yüksek seçilmiştir.			
Seçilen $n_4 =$ <b>0.045</b>			



## Yöntem

Bu çalışmada izlenen yöntem şu şekildedir: Çalışma alanına ait 1/1000'lik haritaları temin edilmiştir. Geçmiş yıllara ait akım debileri ve hidrolojik veriler temin edilmekle beraber çalışma güzergahında bulunan hidrolik yapılar belirlenmiş ve aynı güzergah boyunca AutoCADCivil3D paket programı yardımıyla 200 m aralıklarla ve sağ, sol sahillerde yer yer genişliği 2000 m'yi bulan enine kesitler oluşturulmuştur. Elde edilen topoğrafik veriler HEC-RAS programına aktarılmış ve HEC-RAS programına tanımlanan hidrolik yapılar ve hidrolojik parametrelerden sonra su yüzü profilleri elde edilerek taşkın sınırları belirlenmiştir (Onen ve Ogras, 2018).

HEC-RAS programıyla üzerinde çalışılan Dicle Nehri'nin Diyarbakır yerleşim yerinin etrafındaki 10 km'lik kısımda (Şekil 4.) elde edilen veriler bir araya getirilmiş, modele eklenerek hesaplama yapılmıştır. Böylece membadan mansaba kadar oluşan su yüzü profilleri, hız grafikleri, kot-debi ilişkisini gösteren grafikler, güzergâha ait perspektif görüntüleri elde edilmiştir. Güzergâhımızda membadan itibaren Sadi Köprüsü (Şekil 5), Üniversite Köprüsü (Şekil 6) ve Tarihi On Gözlü Köprü ( Şekil 7) olmak üzere 3 adet sanat yapısı (köprü) bulunmaktadır. Sadi Köprüsü farklı zamanlarda yan yana inşa edilen üç farklı köprüden oluşmaktadır.



Şekil 4. Dicle Nehri Çalışma Güzergâhı



Şekil 5. Sadi Köprüsü Alttan Görünüm



Şekil 6. Üniversite Köprüsü



Şekil 7. Tarihi On Gözlu Köprüsü

## HEC-RAS Programı

ABD Kara Kuvvetleri Mühendislik Grubu tarafından geliştirilen nehir analizi yapan bir boyutlu kararlı hidrolik akım ile bir ve iki boyutlu kararsız nehir akış hesaplamaları, yarı kararsız ve tam kararsız akışlarda hidrolik hesaplamaları yapan bir programdır. Bu yazılım, doğal ve yapılandırılmış kanalların tek boyutlu sabit akışlı su yüzeyi profillerinin hesaplamalarını yapan HEC-2 nehir hidroligi paketinin yerini almıştır. HEC-RAS yazılımı hidrolik mühendislik ve bilgisayar bilimi açısından HEC-2 den daha gelişmiş bir programdır. HEC-RAS'ın ilk sürümü Temmuz 1995'te piyasaya sürülmüştür. O zamandan beri bu yazılım paketinin sürümleri de dahil: 1.1, 1.2, 2.0, 2.1, 2.2, 3.0, 3.1, 4.0,4.1 sürümleri ve en son 5.03 olan son sürümü bulunmaktadır. Bu çalışmada 4.1 sürümü kullanılmıştır.

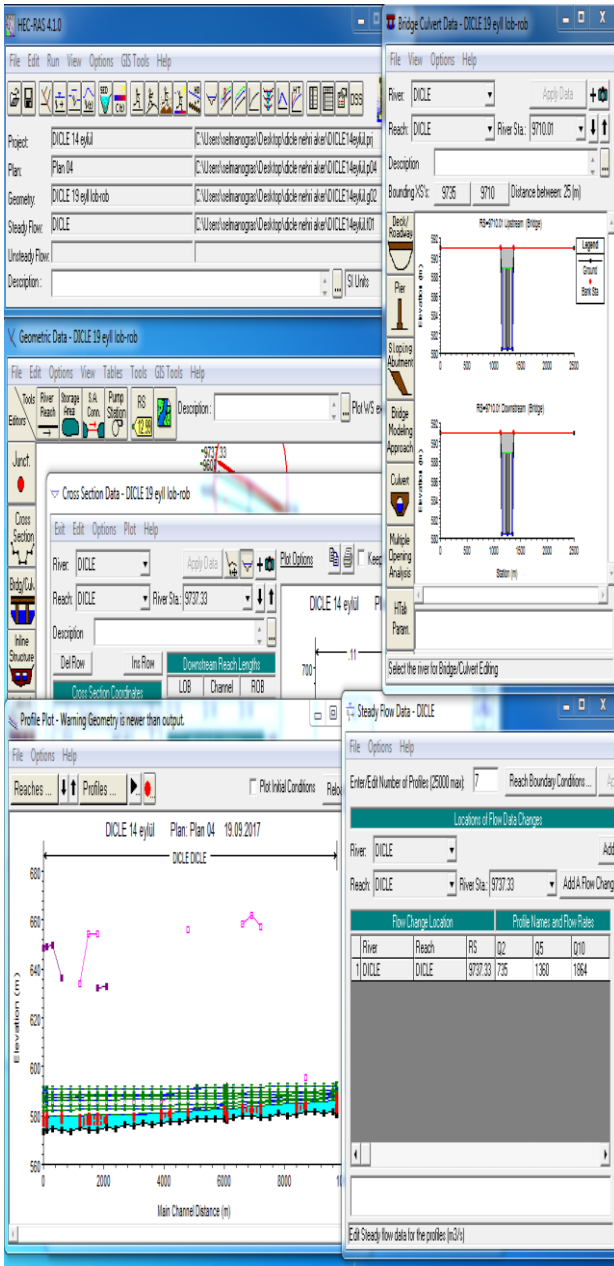
Bu programla, kararlı akım şartları altında su yüzeyi profili belirlenmesinde, kritik altı akım, kritik üstü akım ve karışık çözüm seçenekleri sunulmaktadır. Program, kararlı akım şartları altında yapılan çözümlerde, tek boyutta enerji denklemi temel alınmaktadır. Enerji kayıplarının hesap edilebilmesi için sürtünme katsayısı ve daralma/genişleme katsayılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Momentum denklemi ise, akım rejiminin ani değiştiği durumlarda kullanılmaktadır.

Hidrolik sıçrama, köprü hidroligi, akım girişiminin olduğu bölgeler akım rejiminin ani değiştiği durumlara örnek olarak verilebilir. Analizi yapılan bölgedeki köprü, menfez, su bendi, dolu savak gibi akımı etkileyebilecek yapıların akıma etkisi program sayesinde analizlerde göz önüne alınabilmektedir. Ayrıca analiz bölgesindeki değişimler de programın içerisine yansıtılarak model güncellenebilmektedir (Tuncer, 2011).

Tanımlanması gereken parametreler;

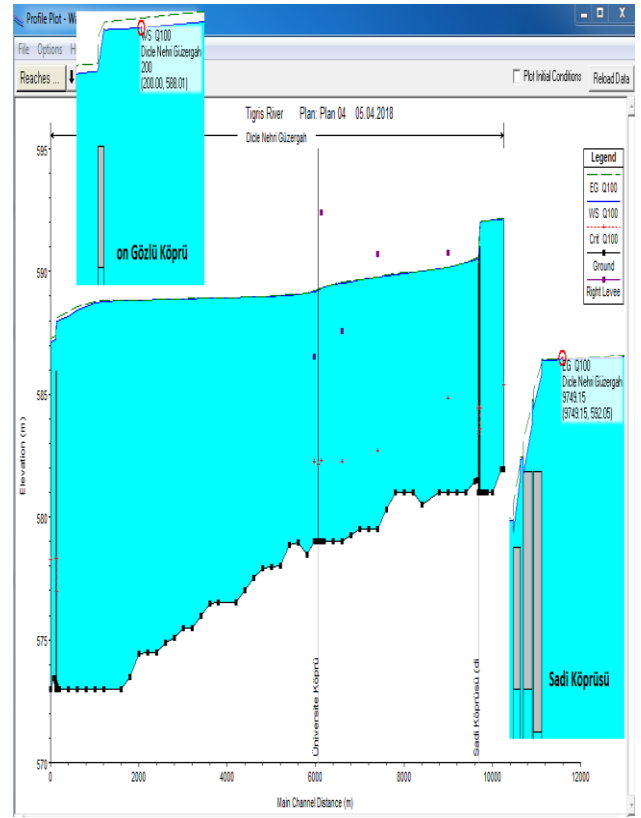
- a) Dere güzergâhı boyunca en kesit numaraları ve en kesit geometrileri
- b) En kesitler arasındaki uzaklık
- c) Pürüzlülük katsayısı
- d) Kanal daralma ve genişleme katsayıları
- e) Güzergâh boyunca engel oluşturan enine yapıların geometrileridir.

HEC-RAS programında enerji çizgisinin en kesitler doğrultusunda sabit olduğu ve hız vektörünün de en kesitlere dik olduğu kabul edilmektedir. Akım geometrisi tanımlandıktan sonra akıma ait hidrolik su değerleri ilk adım veri girişi olarak tanımlanır. Şekil 8 de HEC-RAS Program parametrelerinin olduğu ara yüz gösterilmektedir.

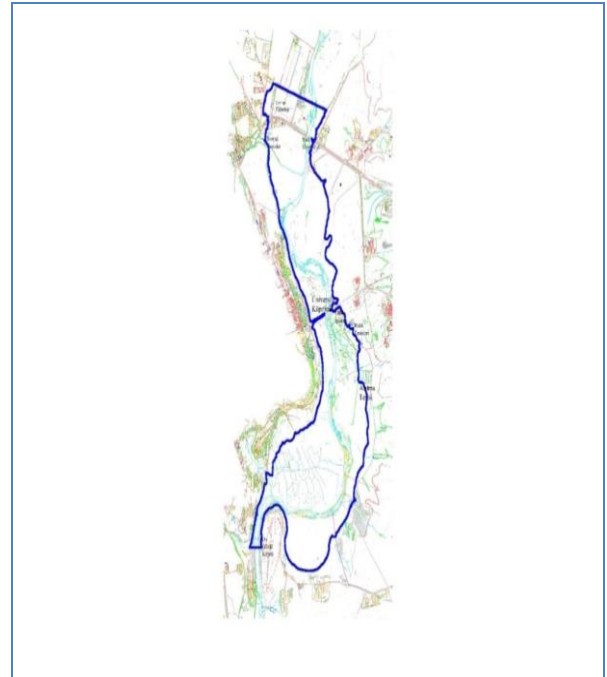


Şekil 8. HEC-RAS Programının Ara Yüzü

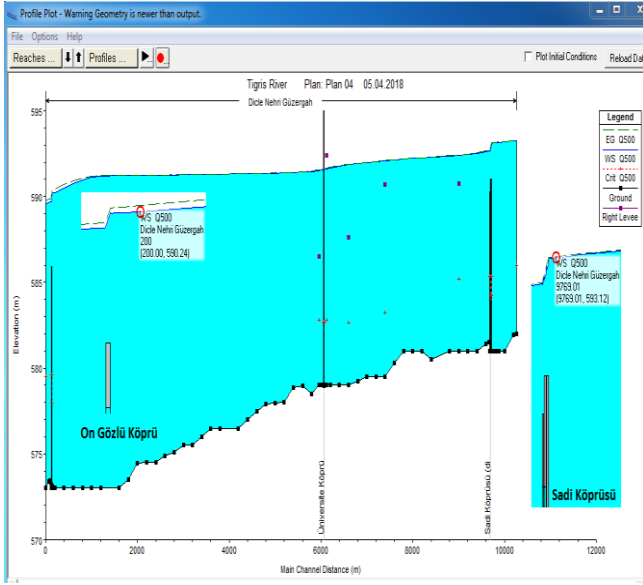
Dicle Nehrinin hidrolik analizleri paket programın 4.1 versiyonu kullanılarak yapılmıştır. Mevcut sanat yapılarının ölçüleri ve gözlemler neticesinde elde edilen veriler de modele eklenerek hesaplama yapılmış ve 100 yıllık, 500 yıllık tekerrür debilerine göre elde edilen su yüzü profilleri ve taşkın sınırları Şekil 9-12 de verilmiştir.



Şekil 9. 100 Yıllık Tekerrür Debisine Göre Elde Edilen Su Yüzü Profili,  $Q_{100}$



Şekil 10. Dicle Nehri  $Q_{100}$  Yıllık Taşkın Sınırları



Şekil 11. 500 Yıllık Tekerrür Debisine Göre Elde Edilen Su Yüzü Profili,  $Q_{500}$



Şekil 12. Dicle Nehri  $Q_{500}$  Yıllık Taşkın Sınırları

## Sonuçlar ve Tartışma

Dicle Nehri doğal bir nehir olmasından ötürü güzergah boyunca farklı en kesit ve pürüzlülük değerleriyle karşılaşmak mümkündür. Bu farklılıklar nehrin geçirebileceği debi miktarını da etkilemektedir. HEC-RAS programıyla yapılan taşkın analizi sonuçları incelendiğinde yatak genişliğinin yer yer 2500 metreye çıktığı görülmektedir. Bu gibi taşkın yatağı

genişliğine ve düşük eğime sahip doğal nehirlerde sağlıklı bir taşkın analizi yapmak elbette güçtür. Ancak elde edilecek güncel haritalar ve bu haritaların araziye uygunluğu, çalışma alanına ait elde edilmiş hassas hidrolojik veriler, arazide yapılan gözlemler neticesindeki veriler ve tüm bu verilerin etkili bir kullanıcı aracılığıyla bir araya getirilmesi ile arazi ve bilgisayar arasındaki uyumun da iyi sağlanmasıyla yapılacak taşkın analizi çalışmaları çok daha sağlıklı olacaktır. Güzergâhımızda kum ocakları, canlı balık üretim tesisleri, verimli tarım arazileri, hastaneler ve kısmi de olsa yerleşim yerleri bulunmasından dolayı taşkın anında önemli zararlar oluşmaktadır. Bu çalışmanın sonuçları göz önüne alındığında; Sadi ve tarihi On Gözlü Köprülerinin kapasiteleri taşkın sularını geçirmekte yetersiz kalmaktadır. UNESCO tarafından Dünya Kültür Mirası Listesine alınan Hevsel Bahçeleri, Dicle Üniversitesine bağlı Taşıt İşletme Şubesi, Kapıtaj, Arıtma Tesisleri, Diyarbakır Orman Bölge Müdürlüğü Fidanlık sahası, Balıkçılık ve Meyvecilik geliştirme projesi kapsamında işletme halindeki tesisler ile Üniversite Köprüsü membasındaki yerleşim yerleri taşkın sınırları içerisinde bulunmaktadır. Muhtemel taşkın zararlarını en aza indirmek için güzergahta yapılacak ıslah çalışmaları pürüzlülük katsayısının düşmesine ve dolayısıyla da taşkın su yüzü üst kotlarında azalmaya neden olacaktır. Bunun yanı sıra Sadi Köprüsünün açıklığının artırılması gerekmektedir. Aynı güzergahta Üniversite Köprüsü açıklığı göz önüne alındığında durum daha anlaşılır olacaktır. Yine kapasitesi yetersiz olan tarihi On Gözlü Köprüsüne müdahale mümkün olmadığından olası zararı önlemek için taşkın sularını derine edecek Kırklar Dağı eteklerinden tekrar Dicle nehrine bağlanan bir tünel inşa edilmesi düşünülebilir. Güzergah üzerindeki Hevsel Bahçelerinin taşkın sularından korunması gerekmektedir. Bunun için Hevsel Bahçelerinin membasında Üniversite Köprüsü açıklığının yeterli olduğu da göz önüne

alınarak regülatör veya memba batardosu gibi çevirme yapıları inşa edilebilir. Böylece taşkın anındaki suyun seviyesi istenilen kota kadar yükseltilerek taşkın suyu depolanacak ve akabinde su yönü de değiştirilmek suretiyle de Hevsel Bahçelerine giden taşkın suyu kontrollü bir şekilde derive edilecektir.

## Teşekkür

Bu çalışma Dicle Üniversitesi DÜBAP Mühendislik 17.016 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Bagatur, T., Hamidi, N., (2014). Evaluation with stream characteristics of downstream flood problems after dam construction. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 22(2), 96-104.
- Bagatur, T., Onen, F., (2018). Development of predictive model for flood routing using genetic expression programming. *Journal of Flood Risk Management*, 11, 444-S454.
- Chow, V.T., (1959). Open Channel, McGraw-Hill. 1- 728, New York
- Cowan, W.L., (1956). Estimating Hydraulic Roughness Coefficients Agricultural Engineering, 37(7), 473-475,
- DSİ, (1971). Dicle Havzası İstikşaf Raporu, DSİ Matbaası, Ankara,
- Düden, İ., (2010). Darıdere Barajının Tedrici Yıkılması ve Yarıktan Çıkan Taşkın HEC-RAS ve Dambrk Programlarında İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 139
- Efe, H., (2014). Batman Çayı'nın Taşkın Analizinin HEC-RAS Programıyla Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Efe, H., Onen, F., (2015). Batman Çayı'nın taşkın analizinin HEC-RAS programıyla yapılması, Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 6(2), 83-92
- Hakan, K., (2007). Mekân Organizasyonu ve Planlama Bağlamında Sel Riskinin İrdelenmesi. TMMOB Afet Sempozyumu, 337-347
- Oğraş, S., (2018). Dicle Nehri'nin Taşkın Analizinin HEC-RAS Programıyla Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Onen, F., Ogras, S., (2018). Flood Analysis of a Part of Dicle (Tigris) River by HEC-RAS Program, 4th International Conference on Engineering and Natural Science, ICENS, Kiev, pp. 849-857
- Onuşuel, G., (2005). Floodplain management based on HEC-RAS modelling system, Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdemir, H., (2007). Taşkınların Haritalanmasında HEC-Geo-RAS ve HEC-RAS'ın Kullanımı: Havran Çayı Örneği. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, 281
- Pehlivan, M., Yavuz, H., Direkçi, E., Eroğlu, H., Kürkcü, Ö., Yorulmaz, Ö., (2016). Taşkın Tesisleri İle Akarsu ve Dere Yataklarına Yapılan Müdahaleler ve Bunların Önlenmesi, IV. Ulusal Taşkın Sempozyumu,
- Tuncer, İ., (2011). Açık Kanallarda Su Yüzü Profilinin Belirlenmesi, Nakkaş Dere Örneğinde Bir HEC-RAS Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, p. 160
- Yaylak, M., (2016). Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Yardımıyla Bitlis Deresi Taşkın Risk Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Yurtal, R., Seçkin, G., Kaya, D., Atabay, S., (2003). Seyhan Nehri Su Yüzü Profillerinde Köprülerden Kaynaklanan Kabarmaların HEC-RAS Paket Programı Kullanılarak Modellenmesi, DMO Teknik Dergi, 14(2), 2935-2948

## Floodplain analysis Of Tigris River using HEC-RAS Software

### Extended abstract

As known, history and water do not separate from each other. Humanity considering for narrow scope but, that situation is applicable to all living beings actually, have preferred settlement areas close to the water resources of the compulsive qualities for permanent living. So intervention in the river beds and hence losses of life and property is inevitable. One of the natural factors affecting the occurring of floods is climatologically meteorological and factor. The shape, severity and duration of rainfall are the factors affecting floods. In addition, the geological structure and temperature of the basin are also important factors. When snow melts occur at low temperatures, it is inevitable that floods occur when the melting snow flows into the flow of surfaces consisting of inclined and impermeable layers. The probability of the floods which are the biggest disaster after the earthquake is very low. But increase in population and increase in population need for water, increase in economic-based needs, changing settlements and insufficient infrastructure conditions and floods in these areas does not work on the basis of basin increases the effect and number of floods.

The Tigris River bed is a flood zone. Especially in the autumn of 2006, 41 citizens lost their lives especially in Diyarbakır and Batman, Cizre Mardin and Şırnak Provinces.

In the course of the study, the Hevsel Gardens located along the Tigris River around the Diyarbakır settlement center, where a large part of Diyarbakır's vegetable and fruit needs were met, and which were also included in the World Cultural Heritage List by UNESCO in 2015, Located on the Tigris River Ten-eyed bridge, with important place and symbolic value in the history of the city, In addition, the Dicle Valley project located on the river on transforming Diyarbakır into a regional sports center and bringing sports and recreation to the forefront in the cultural and social development of the city.

In this study the floodplain analysis was handled between Diyarbakır-Silvan Highway and historical Ten Eye (On Gözlü) Bridge. Bridges over the Dicle River and the cross section changes caused by these hydraulic structures as well as the

facilities of the private establishments located on the route of the floodplain areas, which may occur together with determining the flow effect of the existing natural section changes. The facilities and hospitals connected to the university in the settlement of Dicle University, ten eye bridge(Dicle Bridge), Hevsel Gardens on the UNESCO World Cultural Heritage List, as well as the possible effects on the Dicle Valley project, which is considered to be done in the future years, have been tried to be determined. The 1/1000 maps of the study area were digitized using the AutoCAD Civil 3D program and cross sectional purchases were made by obtaining the digital elevation models of the region. The obtained cross sections were defined in the HEC-RAS software and the hydraulic characteristics of the flood bed and the water surface profiles of the  $Q_{25}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{500}$  flood recurring and one dimensional floodplain analysis of Tigris(Dicle) River were determined. According to the floodplain risk analysis results water surface profiles of flow rates  $Q_{25}$ ,  $Q_{50}$ ,  $Q_{100}$ ,  $Q_{500}$  were obtained.

According to the analysis result, considering the results of this study; the capacities of Sadi and the historical Ten-Eyed Bridges are insufficient to pass flood waters. The Hevsel Gardens, which are included in the World Heritage List by UNESCO, are located within the boundaries of the floodplains and the settlements in the university bridge upstream.

**Keywords:** Tigris River, HEC-RAS, Floodplain Analysis





# Sarsma masası testlerindeki dinamik parametrelerin görüntü işleme yöntemi ile ölçülmesi

**Neslihan AVCI**

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[neslihanavci.tr@gmail.com](mailto:neslihanavci.tr@gmail.com) ORCID: 0000-0002-0050-7202

**Fatih ALEMDAR\***

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[falemdar@yildiz.edu.tr](mailto:falemdar@yildiz.edu.tr) ORCID: 0000-0002-8752-0310 Tel: (212) 383 52 00

Geliş: 07.02.2019, Revizyon: 11.03.2019 , Kabul Tarihi: 14.03.2019

## Öz

*Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyinde LVDT ve ivmeölçer ile edilen dinamik yer değiştirme parametreleri, görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik yer değiştirme parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Görüntülerde referans alınan bölgenin yer değiştirme parametreleri şablon eşleştirme yöntemi ile belirlenmiştir. Fakat referans alınan bölge yer değiştirirken piksel derinliği, yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumda istatistiksel olarak yapılan hesaplamalarda hatalar oluşabilmektedir. Bu sebeple şablon eşleştirme yönteminde akıllı tarama sistemi geliştirilerek hata yapma oranı en aza indirgenmiştir. Klasik şablon eşleştirme yöntemlerinde referans şablon, tüm görüntüde aranmaktadır. Bu durum hem maliyetli hem de hata yapma durumu mevcuttur. Akıllı tarama sisteminde, referans şablonun hızına bağlı olarak tarama alanı belirlenmektedir. Böylece sonraki görüntülerde hareket eden şablonun takip mesafesinde kalınmaktadır. Yapılan çalışmalarda akıllı tarama sistemi ile şablon eşleştirme yönteminin hata oranları % 0,1'in altında bulunmuştur. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi Abaqus SE programı ile modellenmiş olup, çelik çerçeve üzerinde referans alınan noktalardaki yatay dinamik yer değiştirmeler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.*

**Anahtar Kelimeler:** Sarsma masası deneyi, Görsel işleme tekniği, Normalize edilmiş çapraz korelasyon katsayısı, Çelik çerçevenin dinamik parametreleri

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Yapı elemanlarının ve sistemlerinin dinamik etkiler altında davranışlarının belirlenmesinde kullanılan en etkin ve gerçeğe en yakın yöntemlerden biri sarsma masası deneyidir. Sarsma masasının temel çalışma prensibi rijit tablaya bağlanmış yapı modellerini veya yapı elemanlarını, istenilen bir ivme fonksiyonu ile titreştirilmesidir. Uygulanan ivme kaydı, gerçek bir deprem kaydı olabileceği gibi üretilmiş bir kayıt da olabilmektedir. Günümüzde sarsma masaları farklı serbestlik derecelerine sahip olabilmekte, hidrolik ya da daha farklı tahrik sistemleriyle çalıştırılabilmektedir. Masa boyutlarının ve sistem kapasitelerinin sınırlı olması nedeniyle genelde ölçekli numuneler denenmektedir (Mahdavi, 2014).

Sarsma masası deneyi esnasında yapı elemanlarının ve sistemlerinin istenilen bir bölgesinde dinamik parametreleri ölçmek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları doğrusal değişimli diferansiyel transformatörler (LVDT), lineer potansiyometre, piezoelektrik veya mikro elektromekanik ivmeölçerlerdir. Bu yöntemler işçilik, zaman ve maliyet açısından dezavantajlara sahiptir. Son zamanlarda, bu dezavantajlara sahip olmayan görüntü işleme yöntemleri ön plana çıkmaktadır. Sadece dijital kamera, bilgisayar ve uygun bir yazılımla tek bir deney yapılarak deney numunesinin birçok noktasından dinamik yer değiştirmeye ait büyüklükler ölçülebilmektedir.

Literatür araştırması, son yıllarda görüntü işleme yönteminin mühendislik konularında geniş bir kullanım alanı olduğunu göstermektedir. Yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Onat M., betonun kırılmadan önceki potansiyel davranışının görüntü işleme tekniklerini kullanarak incelemiştir. 50x10x10 boyutunda dikdörtgen prizma şeklinde lifli beton numunelerinin 28 günlük külden sonra üç noktalı eğilme

deneyini yapmıştır. Yüke karşılık gelen deplasman miktarlarını bir komparator yardımıyla ölçmüştür. Bu görüntüleri görüntü işleme tekniği ile ortaya çıkan deplasman miktarlarını komparator değerleri ile karşılaştırmıştır (Onat, 2008).

Kılınç İ., çelik numuneler üzerinde farklı çaplarda ve derinliklerde oluşturulan deliklerin taranmış elektron mikroskobu fotoğraflarını çekmiş, daha sonra MATLAB programı yardımıyla derinlikleri piksel cinsinden bulmuş ve örnekleri incelemiştir. Çelik numuneler aşındırıcı ortamda bırakılmış ve daha sonra deliklerin fotoğrafları taramalı elektron mikroskobu ile çekildikten sonra MATLAB programı ile derinlikler hesaplanmıştır. Görüntü işleme yöntemi kullanılarak belirlenen derinlik değerleri ve gerçek oluk derinliği değerleri karşılaştırılmış ve gerçek oluk derinliklerinin maksimum %6,5 nispi hatayla elde edilebileceği sonucuna varılmıştır (Kılınç , 2009).

Fırat Alemdar Z. ve diğerleri farklı yükler altındaki yapısal sistemlerdeki doğrusal olmayan tepkinin yerini incelemiştir. Dört açıklıklı büyük ölçekli bir köprü sisteminin sismik performansını araştırırken, güçlü yer hareketleri altında kolonların plastik bölgelerinden deformasyon verileri elde edilmiştir. Kolonun plastik bölgelerdeki deformasyonlarını kaydetmek ve analiz etmek için üst ve alt yüzeylerine ızgara çizgileri kullanılarak bir fotogrametri yöntemi uygulanmıştır. Betonarme köprü kolonunun dinamik yükleme altındaki deformasyonları ve dönmeleri incelenerek geleneksel test ölçüm cihazlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fotogrametri yöntemi, referans çizgileri kullanılarak çizilen yüzeydeki noktaların yanal ve düşey yer değiştirmelerinin yanı sıra plastik bölgelerin deforme şeklini takip etmeyi başarmıştır, ancak kolonlardaki dönmeler gibi ikincil hesaplamaların sonuçları sınırlı bir başarıya ulaşmıştır (Fırat Alemdar Z., 2011).

İnşaat mühendisliği yapılarında titreşimin hız ve yer değiştirme büyüklüklerinin

ölçümünde sıkça kullanılan sayısal görüntü işleme teknikleri incelenmiştir (Erdoğan, 2018). Görüntü işleme tekniklerinden Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) algoritması, korelasyon tabanlı şablon eşleştirme ve görsel akış yöntemleri kullanılmıştır. Bir laboratuvar test yapısı üzerinde yapay ve doğal hedeflerin takibi ile farklı mesafelerden ölçümler yapılmış ve yöntemlerin performansları incelenmiştir. İlk olarak görüntü işleme yöntemlerinden elde edilen yer değiştirmeler, LVDT yardımıyla ölçülen yer değiştirmeler ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca yöntemlerin performanslarını frekans alanında incelemek amacıyla görüntü işleme ile elde edilen deneysel modal parametreler alışılagelmiş ivmeölçerler ile alınan kayıtlar ile karşılaştırılmıştır (Erdoğan, 2018).

Jo vd. yaptıkları çalışmalarda iki farklı görsel işleme tekniğini birleştirerek ölçülebilir alanı genişletmeyi ve yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla işaretleyiciyi izlemek için NCC işlevini görüntü işleme algoritması olarak kullanarak şablon tabanlı eşleştirmeyi uygulamıştır. Geometrik bozulmayı gidermek için, homografi matris ile düzlemsel bir projeksiyon yöntemi uygulanmıştır. Bu araştırma sayesinde, köprü yer değiştirmelerini kullanıcı dostu bir arayüzle ölçmek için GUI tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. Laboratuvar ölçek testine ek olarak, önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için saha testleri yapılmıştır. Ölçüm hatasını ölçmek için, RMSE'ye dayalı bir hata değerlendirmesi yapılmıştır. Önerilen yöntem, akıllı telefon kamerası ile işaretleyici arasındaki açı arttığında bile yer değiştirme ölçümünün doğruluğunu göstermiştir (Jo, Lee, Jo, & Khan, 2018).

Görüntü işleme tekniklerinden şablon eşleştirme yöntemi ile asma bir köprünün askı kablolarının titreşim frekanslarının bulunmasında kullanılmakla beraber bir demiryolu köprüsünün tren geçişleri esnasındaki titreşimlerinin ölçülmesinde de

kullanılmıştır (Freng, Fukuda, Feng, & Mizuta, 2015). Görsel akış algoritması ise asma köprü kablolarının titreşim ölçümlerinde sabit bir referans hedefe ihtiyaç olmaksızın uygulanmıştır (Kim & Kim, 2013), (Ji & Chang, 2008).

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyi ile elde edilen dinamik parametreleri ile görüntü işleme tekniği ile istatikselsel olarak hesaplanan dinamik parametreleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve Abaqus programı ile modellenmiş, çelik çerçeve üzerinden referans alınan noktalardaki dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Görüntü işleme tekniğinde çok yaygın kullanılan, iki görüntü arasındaki hareketli objeleri bulma tekniği incelenmiştir. Genel olarak kullanılan normalize edilmiş çapraz korelasyon katsayısı yöntemi ile uygulanan görsel işleme tekniğinde oluşan hatalara farklı bir yaklaşımla bir algoritma ile çözüm bulunmuştur.

## Yöntem ve Materyal

### Çelik Çerçevenin Geometrik Özellikleri

3 katlı çelik çerçevenin iki kolonun merkezleri arasındaki mesafe 130 cm olup, katlar arası yükseklik 75 cm'dir. Çelik çerçevenin kolon ve kirişlerinde IPN 100 profili kullanılmıştır. Birleşim bölgelerinde L40x40x4 profili kullanılmıştır. Ayrıca profilin her iki yönünde 2'şer adet M12 bulonları kullanılarak 1450 Nm tork uygulayabilen havalı somun sıkma (Gav 2212) aleti kullanılarak bağlantı gerçekleştirilmiştir. Çerçevenin güçlü eksen kiriş-kolon birleşimi yarı rijit birleşim tipi iken zayıf eksen kolon-kiriş birleşimi mafsallı tip birleşimdir. Kolon-kolon birleşimi 4 mm levha ile 8 adet M12-8.8 bulonları ile gerçekleştirilmiştir. Malzeme olarak S235 çeliği kullanılmıştır. Her kat tek doğrultuda çalışan ahşap kalaslar üzerinde 750 kg statik yüke sahip yaklaşık 225 adet her biri 20x10x10 boyutlarına sahip parke taşı konulmuştur.

**Tablo 1. Çeliği Mekanik Özellikleri**

Minimum Çekme Gerilmesi (MPa)	360
Maksimum Akma Gerilmesi (MPa)	235
Elastisite Modülü (MPa)	200000
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	7850

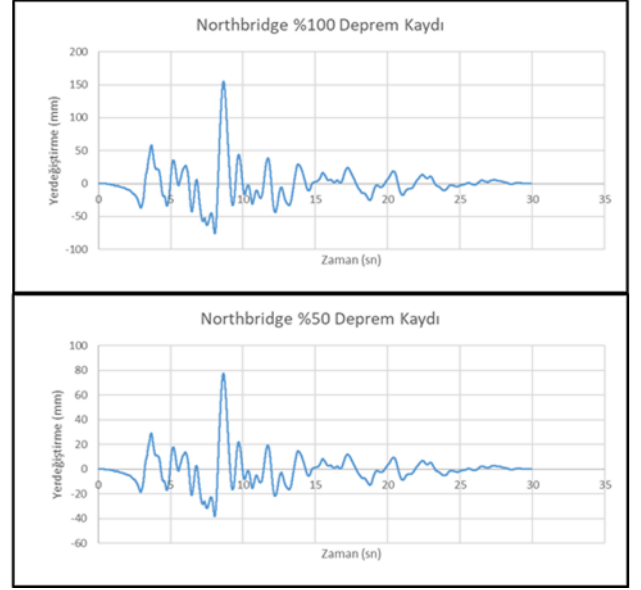


Şekil 1. Sarsma masası deney düzeneği

### Yükleme Testi ve Sonuçları

Sarsma tablasının üzerinden ivmeölçer ve LVDT yardımıyla referans sismik veriler kaydedilmiştir. Gerçek ve referans sismik verileri karşılaştırmak ve aynı zamanda dinamik yer değiştirmelerini gözlemlemek için tüm deneyler aynı açıdan video kaydı alınmıştır.

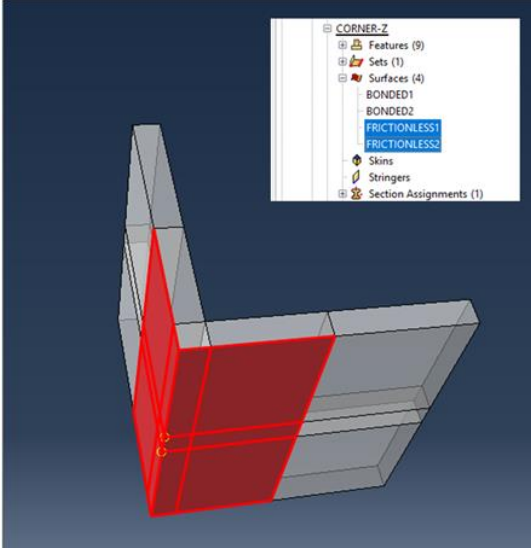
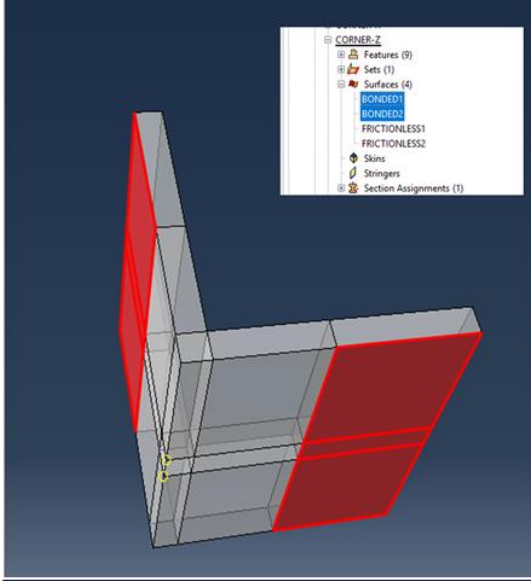
Sismik yükleme deneyi ivme parametreleri Northridge depremi için %50 ve %100 oranda uygulanmıştır (Şekil 2).



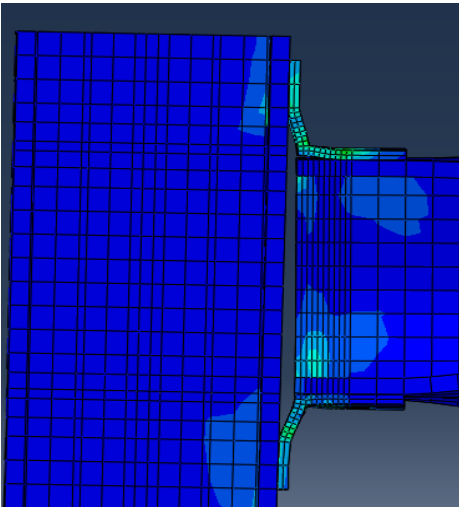
Şekil 2. Sarsma masasından alınan yatay yer değiştirme parametreleri

### Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analiz

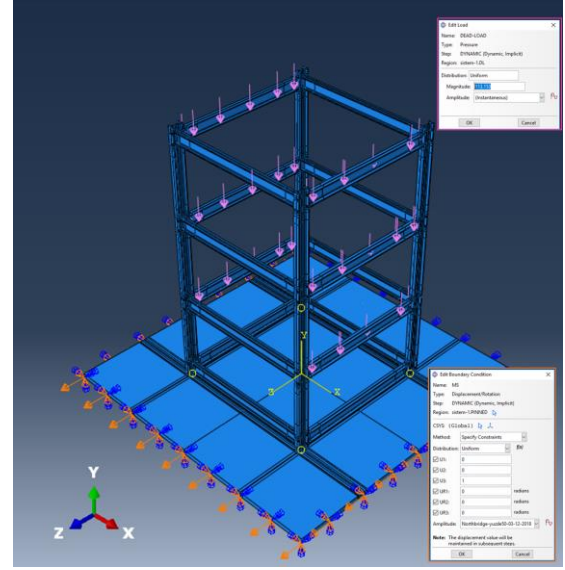
3 boyutlu çelik çerçeve deney numunesi, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile çözümleme yapan ABAQUS paket programı ile modellenmiştir. Çerçeve sistem Şekil 6'de görüldüğü gibi modellenmiştir. Birleşim bölgelerindeki L40x40x4 profil kollarının dış yüzeyleri iki eşit alana bölünmüştür. Dış yüzeylerin uç kısımları tam bağlantılı seçilirken, diğer kısımları frictionless (sürtünmesiz) olarak atanmıştır (Şekil 3). Bu şekilde tanımlama ile gerçek duruma yakın sonuçlar elde edilebileceği düşünülmüştür. Sistem mesh ataması (Şekil 4) birleşim bölgelerinde sıklaştırılıp düzensizlik oluşturmayacak şekilde gerekli yerlerde özel olarak bölümlenmiştir. Statik yük ve dinamik yükler Şekil 5'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır. Implicit dinamik analiz ile dinamik parametreler elde edilmiştir (Şekil 6).



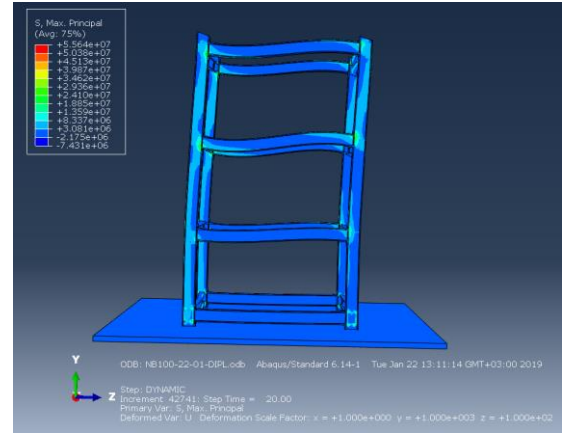
Şekil 3. Kolon kiriş birleşim detayı (z doğrultusu)



Şekil 4. Kolon-kiriş birleşimin arttırılmış deformasyon ve mesh detayı



Şekil 5. Statik ve dinamik yük atamaları



Şekil 6. Deney numunesinin Abaqus modeli ve maksimum gerilme değerleri

## Görüntü İşleme Yöntemi ile Dinamik Yer Değiştirmelerin Ölçülmesi

Bu çalışmada, 3 katlı çelik çerçeve sistemi sarsma masası yardımıyla %50 ve %100 oranında ölçeklendirilmiş Northridge depremi ivme kaydı altında test edilmiş ve dinamik yer değiştirme verileri kamera ile kaydedilmiştir. Kamera sisteme yaklaşık olarak 220 cm uzaklığında ve durağan halde iken numuneye ortalanmış vaziyette dik doğrultuda yerleştirilmiştir. Video kayıt cihazı olarak akıllı telefon kullanılmıştır. Akıllı telefon kamerasının çözünürlüğü 1080x1440 piksel, hızı ise 30 fps'dir. Bu görüntülerden dinamik yer değiştirme verilerinin alınabilmesi için görüntü işleme yöntemi, Matlab yazılım programı dilinde bir algoritma geliştirilmiştir.

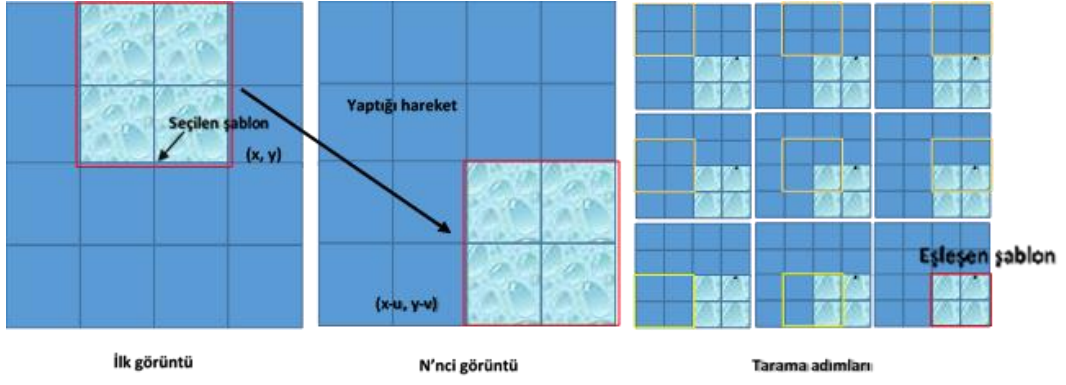
Görüntü işleme tekniğinde, ilk olarak dijital videodan alınan görüntüler bilgisayar ortamında veri biçimleri sayısallaştırılır. Her görüntü içinde RGB renk uzayına sahip sayısal matrislerden oluşmaktadır. Bu matrislerin her bir elemanı bir piksele denk gelir. Bir piksele denk gelen mm cinsinden karşılığı kameranın hedefe uzaklığı ve açısı ile değişir.

Görüntüdeki piksel değerlerinin ağırlığını belirten grafiksel bir gösterim olan histogramın düzgün yayılı hale getirilmesi (histogram eşitleme) ile görüntüler netleştirilebilir. Görüntü işleme tekniğinin ilgi alanları; görüntü iyileştirme (renk, keskinlik ve parlaklık ayarlama, gürültü giderme), görüntü bölümlenme (kenar belirleme, alan yakalama), görüntü dönüşümleri (büyütme, küçültme; döndürme), görüntü onarma, sıkıştırma, algılama, görüntüleri birleştirme, görüntüleri çıkarma vb. uygulamalardır. Bir görüntüdeki şablonun başka bir görüntüdeki yerinin tespit edilme işlemine şablon eşleştirme adı verilir. Görüntüden nokta detaylar, kenarlar ya da alanlar çıkarılarak bu ayrıntılara dayalı eşleme gerçekleştirilebilir. Görüntü boyutu, şablon görüntüsünün boyutundan büyük olmalıdır.

Sarma masası deneyinden görüntü işleme tekniği ile dinamik yer değiştirmelerin ölçülebilmesi için, numunenin üzerinde ayırt edici şekil ve renkte olan etiketler bulunmalıdır. Bu etiketler, dinamik yer değiştirmelerin tespitinde kolaylık sağlamaktadır.

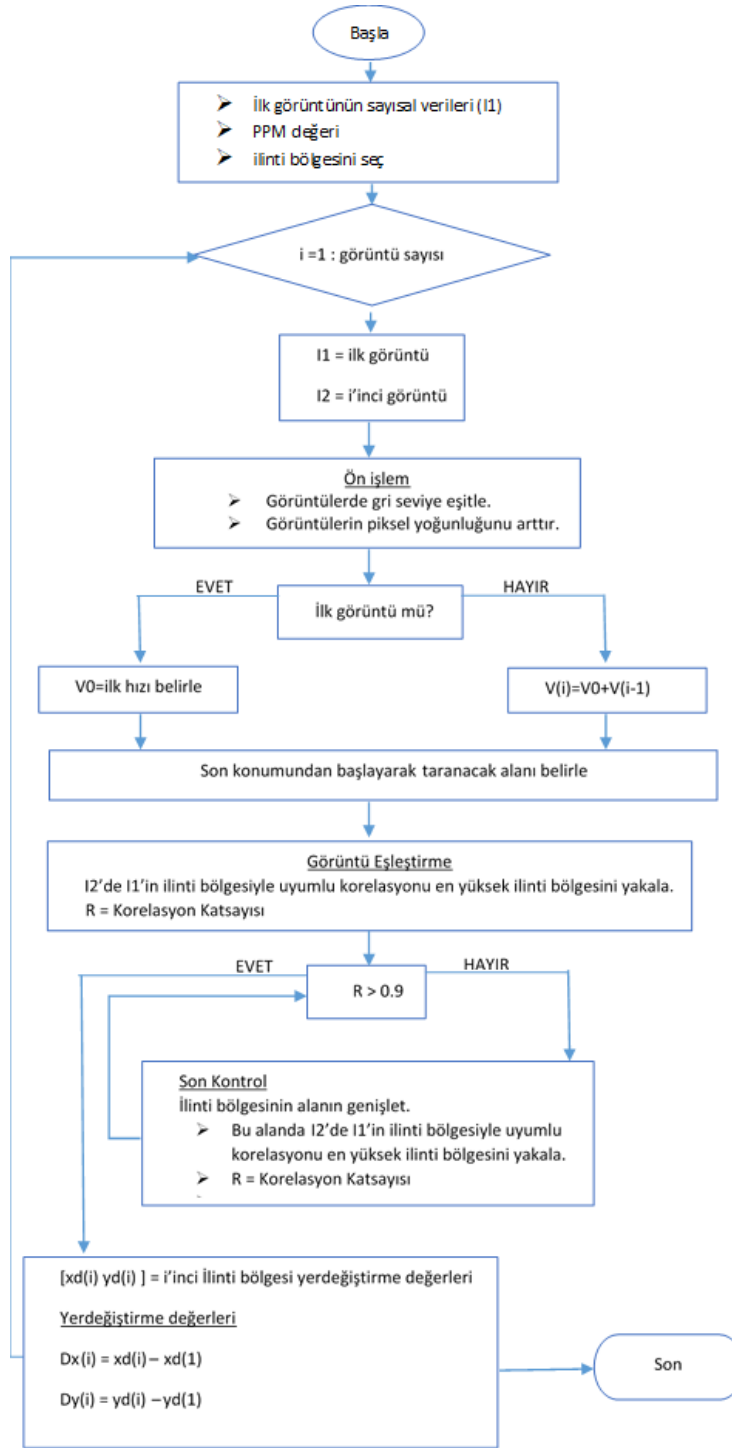
Korelasyon tabanlı şablon eşleştirme yönteminde, ilk görüntüden herhangi bir etiket şablon içine alınır, şablonun piksel bazlı koordinatları kaydedilir. İlk görüntülerde seçilen şablon ile sonraki görüntülerde en yüksek benzerliğe sahip bölge tespit edilir. Şekil 7'de görüldüğü gibi seçilen şablon referans görüntüde x ve y yönünde taranır. Fakat bu durum maliyetlidir. Bu sebeple akıllı tarama sistemleri bu maliyeti en aza indirir.

İki görüntü arasındaki benzerlik birçok yöntem ile belirlenebilir. Bu çalışmada normalize edilmiş korelasyon katsayısı kullanılmaktadır. İstatistiksel olarak iki görüntü arasındaki hareketli objenin tespiti, Matlab programında hazır olarak bulunan `normxcorr2` ve `cpcorr` kodları ile yapılmaktadır. Fakat tek başına bu kodların kullanılması durumunda hesaplamalarda hataların oluşabileceği görülmüştür. Referans alınan bölge yer değiştirirken piksel derinliği, yer değiştirme ve şekil değiştirmeye bağlı olarak değişebilmektedir. Bu durumda istatistiksel olarak yapılan hesaplamalarda hatalar oluşabilmektedir. Diğer yandan referans bölgesi ile aynı şekle sahip başka bölgeler olduğunda yine istatistiksel olarak hatalar oluşmakta benzer olan diğer bölgeyi seçebilmektedir. Bu oluşan hatalardan dolayı farklı bir algoritma geliştirme gereği duyulmuştur. Geliştirilen algoritmada benzerlik ilişkisi, Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden `Corr2` kodu olan, çapraz korelasyon katsayısı kullanılmıştır. Fakat burada ilave olarak akıllı arama sistemi geliştirilmiştir.



Şekil 7. Şablon eşleştirme yönteminin temel gösterimi

## Akıllı Arama ile Şablon Eşleştirme Yöntemi Algoritması



Korelasyon ilişkisinin daha güçlü sağlanması ve daha hassas hareketleri bulabilmek için görüntüyü piksel başına düşen metrik değeri küçültülmüştür

(Matlab/Toolbox/Image/Resize). Bunu yaparken lineer dağılım göstermektedir.

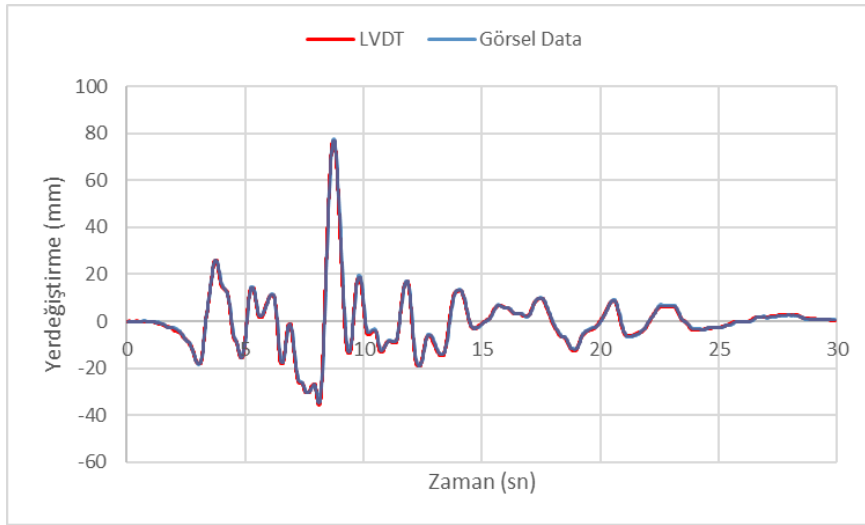
Seçilen bölgenin korelasyon ilişkisi istenilen seviyede değilse, ilinti alanı belirli



seviyede artırılıp global sistemdeki hareket kontrol edilir. Program global sistem hareketi ile ilinti bölgesinin taranması gereken alanı belirleyip, ilinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediğinin kontrolünü yapmaktadır. Genel olarak, bölgenin şekli değişmişse ve/veya dönme yapmışsa bu durum ortaya çıkmaktadır. Kontrol aşamasında, ilinti bölgesinin alanı artırılır. İlinti bölgesinin doğru tespit edilip edilmediği belirlenmektedir.

### Sarsma Masası Deneyi ve Görüntü İşleme Tekniği İle Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

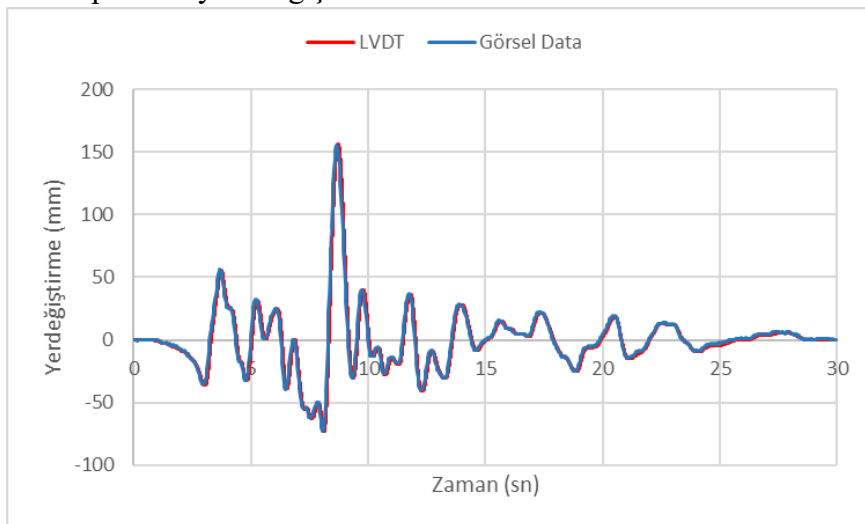
Sarma masası üzerindeki ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), sarsma masası üzerindeki herhangi iki montaj deliğinin arası piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur.



Şekil 8. Northridge %50 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

Şekil 8'de %50 ölçekli Northridge deprem hareketi altında sarsma tablasına uygulanan yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından hesaplanan yer değiştirme

değerleri zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9971 olarak bulunmuştur.



Şekil 9. Northridge %100 deprem kaydı için sarsma tablasının analizi

Şekil 9'da görüldüğü üzere %100 ölçekli Northridge deprem kaydının sarsma tablasına uyguladığı yer değiştirme verileri ile Image Analysis programından elde edilen verilerin yer değiştirme-zaman grafikleri karşılaştırılmıştır. İki grafiğin korelasyon katsayısı 0.9982 olarak bulunmuştur.

Görüldüğü üzere sarsma masası üzerinden alınan yer değiştirmeler ile görüntüden hesaplanan yer değiştirmeler arasında %0.1'in altında bir hata oranı bulunmuştur. Görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik parametrelerin doğruluğu bu şekilde kanıtlanmıştır. Bundan sonraki aşamada çelik çerçeve numunesi Abaqus programında

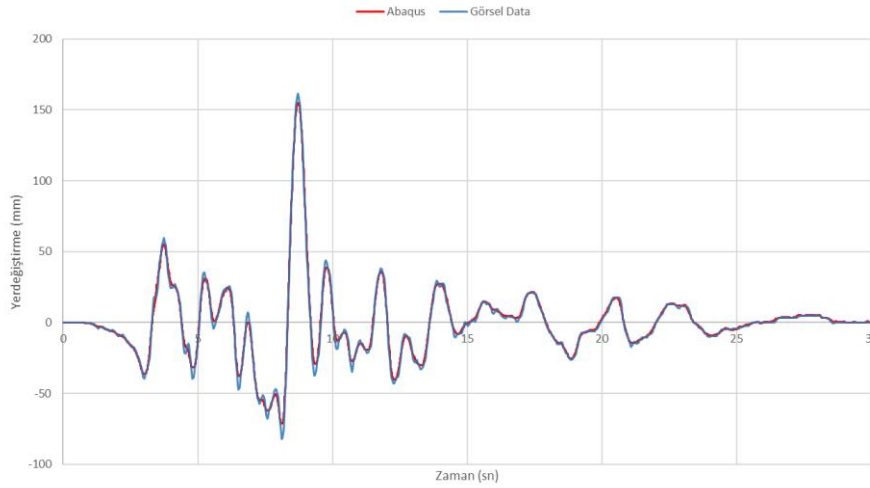
modellenmiş ve buradan alınan veriler ile görüntü işleme tekniği ile elde edilen yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır.

### Abaqus Programı ve Görüntü İşleme Tekniği ile Elde Edilen Dinamik Parametrelerin Karşılaştırılması

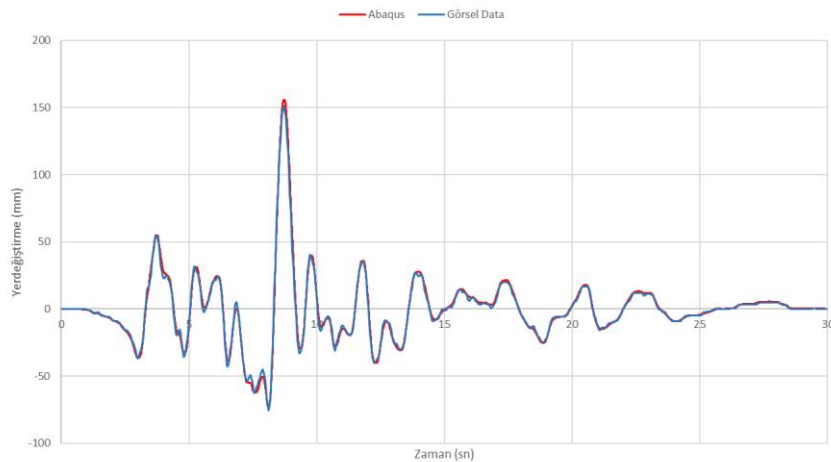
Tüm ölçümlerde piksel/mm oranı (PPM), bulonlar arası mesafe piksel cinsinden görüntüden belirlenip, mm cinsinden karşılığı ile oranlanarak bulunmuştur.

Referans şablonun kameranın merkez noktasından uzaklığı ve açısı ile PPM değeri de değişeceği için hesaplamalarda en yakın bulonlar arası mesafe ile PPM değeri bulunmuştur.

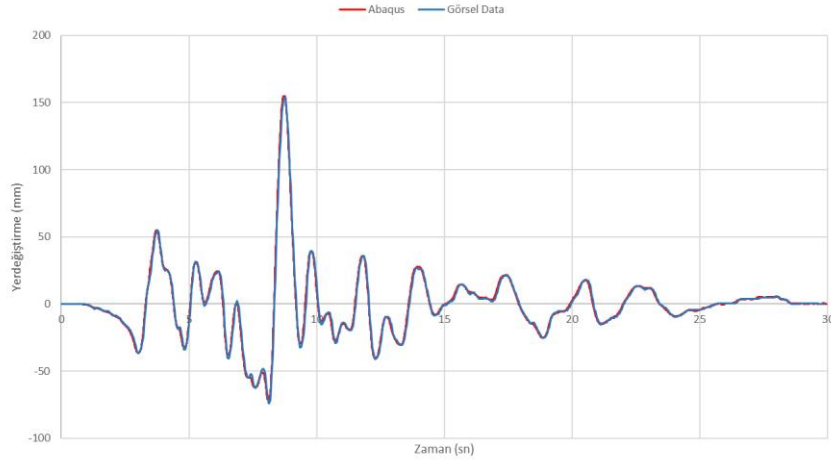
### %100 ölçekli Northridge deprem kaydı için yatay yer değiştirme parametreleri



Şekil 10. Northridge %100 deprem kaydı için 3. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

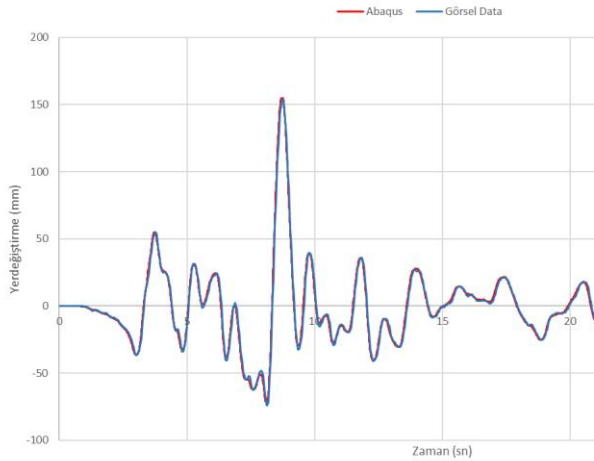


Şekil 11. Northridge %100 deprem kaydı için 2. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması



Şekil 12. Northridge %100 deprem kaydı için 1. kat dinamik parametrelerin karşılaştırılması

Şekil 10'da görüldüğü gibi 3. kat sol kolonun üst kısmında PMM değeri 2.2 mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9855 olarak bulunmuştur. Şekil 11'de görüldüğü gibi 2. kat sol kolonunda PMM değeri 2.1 mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9915 olarak bulunmuştur.



Şekil 12'de görüldüğü gibi 2. kat sol kolonun üst kısmında PMM değeri 2.2mm/piksel olarak belirlenmiştir. İki grafik arasındaki kolerasyon katsayısı 0.9955 olarak bulunmuştur.

Abaqus programından alınan yer değiştirmeler ile şablon eşleştirme yöntemi ile alınan yer değiştirmeler karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde çelik çerçevenin en üst katından alt katlara doğru gidildikçe grafikler arası korelasyon

katsayısının arttığı ve grafiğin tepe ve dip noktalarındaki sapmaların azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin Abaqus programında parke taşların arasında oluşan küçük boşlukların oluşturacağı titreşimlerin göz ardı edilmesidir. En üst katta yer değiştirme daha büyük olduğu için bu etki daha fazla görülmektedir.

### Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, 3 boyutlu çelik çerçeve deneysel numunenin, sarsma masası deneyinde LVDT ve ivmeölçer ile edilen dinamik parametreler, görüntü işleme tekniği ile istatistiksel olarak hesaplanan dinamik parametreler ile karşılaştırılmıştır. Görüntü işleme tekniği akıllı tarama sistemi geliştirilerek hata yapma oranı en aza indirgenmiştir. Bunun sonucunda hata oranları % 0.1'in altında bulunmuştur. Ayrıca 3 boyutlu çelik çerçeve sistemi Abaqus SE programı ile modellenmiş olup, çelik çerçeve üzerinde referans alınan noktalardaki yatay dinamik yer değiştirmeler, görüntü işleme tekniği ile elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır.

Farklı ölçeklerde uygulanan Northridge deprem kayıtları için tüm karşılaştırma grafiklerine bakıldığında grafiğin en üst ve en alt noktalarındaki değerler arasında fark olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin Abaqus SE modelinde parke taşlarının titreşim etkisinin göz ardı edilmesi olduğu

düşünülmektedir. Uygulanan deprem hareketinin hızı sifıra yaklaştığında parke taşlarının titreştiği gözlenmiştir. Ayrıca referans şablon artı yönde yaptığı hareket kameranın görüntü merkezine yaklaşmakta, eksi yönde yaptığı hareket ise kameranın görüntü merkezinden uzaklaşmaktadır. Burada da mm/piksel değeri değişmektedir. Bu çalışmada tek bir mm/piksel değeri belirlenmiştir. Hareketin kamera merkezine en yakın ve en uzak olduğu durumlarda hatalar oluşabilmektedir. Genel olarak hata oranı kabul edilebilir düzeyde kalmakla birlikte istenirse, (Choi, Kim, & Kim, 2016), (Khuc & Catbas, 2017) ve (Feng & Feng, 2017)'de olduğu gibi bu düzeltmeler yapılabilir.

Görüntü işleme tekniği ile dinamik analiz deneyimleri sonucunda önem arz eden bazı hususlar fark edilmiştir. Deney esnasındaki video kaydı yapan kameranın çözünürlüğü ve hızı arttıkça elde edilen veriler daha sağlıklı olmaktadır. Çözünürlüğü az olan bir kamera görüntüsünün boyutu değiştirilerek (Matlab programının Toolbox görüntü işleme kütüphanesinden resize kodu ile görüntünün boyutu değiştirilmiştir) mm/piksel oranı artırılabilir. Bu işlem çözünürlük sorunu büyük oranda çözebilmektedir. Fakat yüksek hızlı yer değiştirmelerde kameranın kaydetme hızının önemi ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kameranın dinamik parametreleri alınmak istenilen noktaya olan uzaklığı ve açısının artması yine görüntü işleme tekniğinde maliyetli bir durumdur. Burada önem arz eden husus elde edilen verilerin hata oranını kabul edilebilir seviyede tutacak kamera uzaklığı ve açısı belirlemektir. Ayrıca deney numunesinin ve referans noktalarının birbirine zıt iki renk seçilmesi görüntü işleme analizini kolaylaştıracaktır.

Bu çalışmada olduğu gibi sarsma masası deneyinde, büyük ölçekli bir deneysel numune kullanıldığında birçok noktadan dinamik parametreler elde edilmek istenebilir. Ölçüm aletlerinin numune üzerine yerleştirilmesi, ölçümlerin hassasiyeti, ölçüm alınan noktaların

fazlalığı bu dinamik parametrelerin elde edilme maliyetini arttırır. Fakat görüntü işleme tekniği kullanılarak dinamik parametreler daha ekonomik olarak elde edilebilir. Ayrıca görüntü işleme tekniği ile yer değiştirme parametreleri tayininde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Anlaşılacağı üzere birçok yöntemeye göre görüntü işleme tekniği çok daha pratik ve ekonomik çözümler sunmaktadır.

Gelecekte yapılacak sarsma tablası deneylerinde alınacak video kayıtlarında yüksek kayıt hızına sahip kamera kullanılması ile daha hassas sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir.

### Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan Sarsma Tablası için Kalkınma Ajansına TR10/15/YNK/034 Nolu Proje'ye sağladığı desteklerinden dolayı teşekkür etmektedir.

### Kaynaklar

- Choi, I., Kim, J., & Kim, D. (2016). A Target-Less Vision-Based Displacement Sensor Based on Image Convex Hull Optimization for Measuring the Dynamic Response of Building Structures. *Sensors*, 16, 1-17.
- Erdoğan, Y. S. (2018). Sayısal Görüntü İşleme ile Titreşim Yer Değiştirmelerinin Ölçümü ve Modal Parametre Tayini. *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 401-415.
- Feng, D., & Feng, M. Q. (2017). Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 88, 199-211.
- Fırat Alemdar Z., B. J. (2011). Photogrammetric Measurements of Rc Bridge Column Deformations, *Journal of Engineering Structures*, Vol. 33 Issue 8 , 2407-2415.
- Fırat Alemdar, Z., Bilici, S., & Alemdar, F. (2018). Photogrammetric

- Measurements of Rc Bridge Column Deformations. *Sigma J Eng & Nat Sci* 9(2), 149-156.
- Freng, M. Q., Fukuda, Y., Feng, D., & Mizuta, M. (2015). Nontarget Vision Sensor for Remote Measurement of Bridge Dynamic Response. *Journal of Bridge Engineering*, 20, 1-11.
- Ji, Y. F., & Chang, C. C. (2008). Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement. *Journal of Bridge Engineering*, 13, 34-42.
- Jo, B.-W., Lee, Y.-S., Jo, J., & Khan, R. (2018). Computer Vision-Based Bridge Displacement Measurements Using Rotation-Invariant Image Processing Technique. *Sustainability*, 10, 1785.
- Khuc, T., & Catbas, F. N. (2017). Completely contactless structural health monitoring of real-life structures using cameras and computer vision. *Structural Control and Health Monitoring*, 24.
- Kılınç , İ. (2009). *Çelik Malzemelerde Korozyon Oyuklarının Görüntü İşleme Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi*. Sakarya: Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Kim, S. W., & Kim , N. S. (2013). Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing. *NDT&E International*, 59, 25-33.
- Mahdavi, M. (2014). *Arı-I Sarsma Masası Performans Değerlendirmesi*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Onat, M. (2008). *Dijital görüntü işleme yöntemleriyle lifli beton numunelerindeki çatlakların tespit edilmesi*. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

## Measurement of dynamic parameters in shaking table tests with image processing method

### Extended abstract

*In this study, the dynamic parameters of the 3-dimensional steel frame experimental sample obtained by the shaking table experiment and the dynamic parameters calculated by image processing technique are compared. In addition, the 3D steel frame was modeled with the Abaqus program and the dynamic parameters at the reference points on the steel frame were compared with the data obtained by image processing technique. The technique of finding moving objects between two images, which is widely used in image processing technique, is examined. The solution has been found by using an algorithm with a different approach to the errors in the visual processing technique applied by the normalized cross correlation coefficient method.*

*It has been observed that errors can occur in calculations if the cross-correlation coefficient and the template matching method are used alone. When changing the reference area, the pixel depth may vary depending on the displacement and deformation. In this case, errors can occur in the statistical calculations. On the other hand, when there are other regions with the same shape as the reference region, statistical errors can be selected and the other region which is similar is selected. Therefore, a smart scanning system has been developed. The movement area of the referenced template is calculated by adding the standard deviations to the speed obtained by the displacement of the selected template in the temporal area so that it does not deviate to other similar regions a while the correlation zones are being scanned. If the correlation relationship of the selected region is not at the desired level, the template area is increased at a certain level. With the global system movement, the program determines the area to be screened for the template region and checks whether the correlation zone is correctly identified.*

*As a result, the dynamic parameters of the 3-dimensional steel frame experimental specimen, the LVDT and the accelerometer in the shaking table experiment were compared with the dynamically calculated dynamic parameters by the image processing technique. The image*

*processing technique is developed by intelligent scanning system and the error rate is minimized. As a result, the error rates were less than 0.1%. In addition, the 3D steel frame system was modeled with the Abaqus SE program and the horizontal dynamic displacements at the reference points on the steel frame were compared with the data obtained by the image processing technique. When the comparison graphs for Northridge earthquake records are applied at different scales, it is seen that there is a difference between the values at the top and bottom points of the graph. The reason for this is that the vibration effect of the paving stones in the Abaqus SE model is considered to be ignored.*

*As in this study, it is desirable to obtain dynamic parameters from many points when a large scale experimental sample is used in the shaking table experiment. The placement of the measuring instruments on the sample, the accuracy of the measurements, the excess of the measured points, increase the cost of obtaining these dynamic parameters. However, dynamic parameters can be obtained more economically by using image processing technique. In addition, very good results were obtained in the determination of displacement parameters by image processing technique. As it will be understood, in many ways the image processing technique offers much more practical and economical solutions.*

**Keywords:** *Shaking table experiment, Visual processing technique, Normalized cross correlation coefficient, Dynamic parameters of steel frame*



# Destek Vektör Makineleri ve M5 Karar Ağacı Yöntemleri Kullanılarak Yağış-Akış İlişkisinin Tahmini

**Mustafa DEMİRCİ \***

İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İskenderun-Hatay  
[mustafa.demirci@iste.edu.tr](mailto:mustafa.demirci@iste.edu.tr) ORCID: 0000-0002-3249-2586

Geliş: 11.02.2019, Revizyon: 13.03.2019, Kabul Tarihi: 01.04.2019

## Öz

*Havza yönetimi ve afetlerin engellenmesi, su kaynaklarının daha verimli kullanılması ve su yapılarının inşasının planlaması amacı ile yağış ve akış verilerinin tahmini büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Amerika Birleşik Devletleri Waltham Massachusetts'de yer alan Stony Brook rezervuarını besleyen Stony Brook nehrindeki 731 günlük yağış, akış ve sıcaklık bilgilerini içeren veriler kullanılarak modeller oluşturulmuştur. Bu veriler Destek Vektör Makineleri (SVM) ve M5 Karar Ağacı (M5T) yöntemlerinde girdi olarak kullanılmış ve yağış-akış ilişkisi tahmin edilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar gerçek ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmaları yapılmıştır. Bunun sonucunda M5 Karar Ağacı (M5T) modellerinin akış tahmininde daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.*

**Anahtar Kelimeler:** Yağış-Akış; Tahmin; Destek Vektör Makineleri; M5 Karar Ağacı

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Yağış ve akış hidroloji bilimi için en önemli parametrelerdendir. Bir havzaya düşen yağışın belli aşamalardan geçip en son akışa dönmesi ve bunun miktarının doğru analiz edilmesi taşkın kontrolü, su temini ve hidroelektrik santralleri ile enerji üretimi gibi su yapıları tesislerinin inşası için yapılacak planlamalarda doğru bir projelendirme ve uygulama açısından mühendisler için büyük bir önem taşımaktadır. Bu analizler yapılırken günlük, aylık ve yıllık yağış verileri kullanılabilir. Veriler ne kadar geniş bir aralıkta ve istikrarlı olursa sonuçlar da o kadar tutarlı olur. Yağış akış ilişkisinin belirlenmesinde genel olarak iki yöntemden bahsedilebilir. Bunlar parametrik ve sistem yaklaşımı olarak bilinen Kara Kutu modelleridir. Parametrik modeller yağışın akışa dönüşme sürecini bütün ayrıntıları ile ele alır. Havzayı sızma, buharlaşma, yüzeysel ve yer altı akışı şeklinde bütün parametrelerine ayırır. Kara Kutu modellerinde ise havzada gerçekleşen fiziksel olaylar dikkate alınmaz. Havzaya sadece yağış akışa dönüştüren matematiksel bir fonksiyon gözüyle bakılır.

Yapay Zeka yöntemleri de kara kutu modelleri olarak adlandırılmakta ve son yıllarda hidrolik ve su yapıları planlamalarında sıkça kullanılmaktadır. (Demirci vd, 2015a, 2015b, 2016, 2017, 2018a, 2018b; Kaya vd., 2016, 2018; Tasar vd, 2017, 2018; Demirci and Baltacı, 2013; Unes, 2010a, 2010b; Unes ve Demirci, 2015; Unes vd, 2015, 2017a, 2018a, 2018b) . Kara kutu modellerinden Yapay Sinir Ağları (YSA) öğrenebilme ve genelleme özellikleri nedeniyle karmaşık problemleri başarı ile çözebilme yeteneğini ortaya koymaktadır (Ergezer vd, 2003). Yapay sinir ağlarını ile ilgili ilk modellemenin temelleri McCulloch ve Pitts'in, (1943) yılında yayınladıkları bir makaleyle atılmıştır. Çalışmalarında elektrik devreleri üzerinde basit yapay sinirler modellemiştir. Günümüzde YSA'nın su kaynaklarında sıkça karşılaşılan değişik problemlere uygulanması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. YSA yaklaşımının yağış-akış ilişkisini iyi temsil ettiği gösterilmiştir (Hsu vd, 1995; Mason vd, 1996; Minns ve Hall, 1996; Fernando ve Jayawardena, 1998; Unes vd, 2018c).

Hamidi ve Demirci (2006) Botan çayında ve Hamidi ve Kayaalp (2008), Dicle nehrinde YSA ve Regresyon yöntemlerini kullanarak yağış, akış ve sediment ilişkilerinde çok sayıda modeller üretmişlerdir. Turhan (2012) yaptığı çalışmasında YSA yöntemi ile Seyhan Havzası'nın yağış-akış ilişkisini modellemiştir.

Destek Vektör Makineleri (SVM), Vapnik ve diğer araştırmacılar tarafından geliştirilen makine öğrenme algoritmalarıdır (Vapnik, 1995, Cortes ve Vapnik, 1995, Vapnik vd, 1997). Bu yaklaşım ilk başta sensör verilerini yorumlamanın bir yolu olarak geliştirildi ve iki katmanlı bir yapı içermektedir. İlk katman giriş değişken serisini içeren destek vektörleri üzerindeki ağırlıksız doğrusal olmayan bir çekirdektir ve ikincisi çekirdek çıktılarının ağırlıklı bir toplamıdır. Birçok durumda, destek vektörleri ve uygun çekirdek filtreleri belirlendikten sonra SVM'ler, YSA yöntemlerine göre daha verimli olabilir. Birçok araştırmacı, SVM'leri kullanarak hidrolojik problemleri çözmeye olasılığını araştırmıştır. Dibike vd, (2001), YSA modellerine kıyasla yağış-akış modellemesi için SVM'leri araştırmıştır. Bray ve Han (2004), yağış modellemesi için uygun bir model yapısının ve ilgili parametrelerin belirlenmesindeki zorlukların altını çiz(diler)miştir. Chen vd, (2010) Hanjiang havzasında günlük yağışları tahmin etmek için SVM'leri kullanmıştır. SVM tekniği son zamanlarda ormancılık problemlerini çözmeye Nieto vd, (2012), güneş ışınlarını belirlemede ve günlük yağış akışını tahmin etmede başarılı olmuştur. Son zamanlarda, SVM'ler özellikle yağış-akış (Hosseini ve Mahjouri, 2016) ve su rezervuarlarını( Khan ve Coulibaly 2006; Asefa vd, 2005; Khalil vd, 2006) tahmin etmede yaygın olarak kullanılmıştır.

Yapay zeka yöntemlerinden bir tanesi olan M5 karar ağacı yöntemi (M5T), sınıflandırma ve regresyon problemlerine uygulanabilen, etkili, parametrik olmayan, yoğun hesaplama gerektiren bir yöntemdir. Birçok araştırmacı çalışmalarında yağış-akış tahmininde M5T'yi kullanmışlardır (Rao vd, 2005; Bathettchery ve Solomatine, 2005; Solomatine ve Xue, 2004). Sattari vd, (2013), M5T karar ağacını yöntemini kullanarak, Türkiye, Ankara, Sohu



Nehri'ndeki günlük akarsu akışını potansiyelini araştırmışlar ve M5T sonuçları, destek vektör makinaları (SVM) ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada, ABD'nin Stony Brook Rezervuarı havzasında bulunan 01104480 numaralı gözlem istasyonuna ait 731 günlük yağış, sıcaklık ve akış verileri girdi olarak girilip yeni akış değerleri Destek Vektör Makineleri (SVM) ve M5 Karar Ağacı (M5T) yöntemleriyle belirlenmeye çalışılmış ve sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

## Materyal ve Yöntem

### Çalışma Alanı ve Uygulama

Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Massachusetts eyaletinde yer alan Waltham Barajı yakınlarındaki 42°21'20" Enlem ve 71°15'56" Boylamındaki Stony Brook rezervuarını besleyen Stony Brook nehri çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada drenaj alanı 61.8 km<sup>2</sup> ve depolama kapasitesi 1.340.000 m<sup>3</sup> olan Stony Brook havzası Stony Brook nehri istasyonundaki veriler kullanılmıştır.

Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırma Kurumu'ndan (USGS) alınan 01104480 numaralı istasyon verileri 07.05.2011-07.05.2013 tarihleri arasındaki 731 günlük yağış, akış ve sıcaklık bilgilerini içermektedir. Çalışma alanının konumu Şekil 1'de gösterilmiştir.



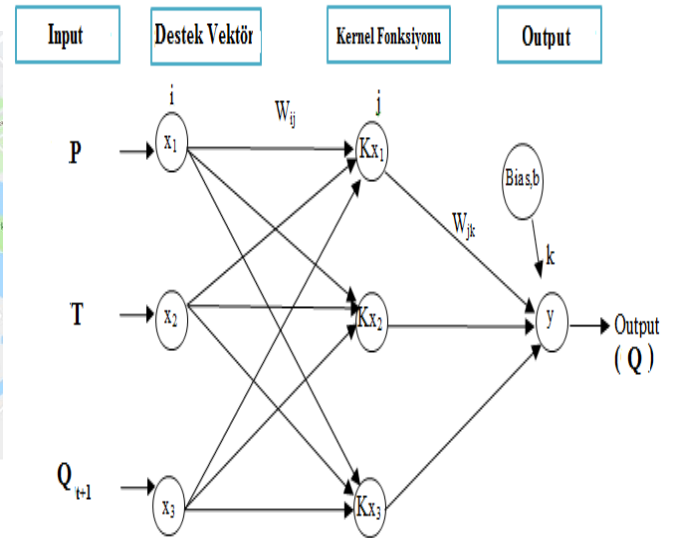
Şekil 1. Çalışma alanı (Google Maps)

### Destek Vektör Makineleri (SVM)

Destek vektör makineleri (SVM), Vapnik (1995) tarafından bulunan veri odaklı araştırma alanlarında makine öğrenme yaklaşımıdır. SVM istatistiksel öğrenme teorisine dayanmaktadır. SVM temel olarak iki veri sınıfını en iyi şekilde ayırt etmek için kullanılır. Bu amaçla karar sınırları veya hiper düzlemler belirlenir. Doğrusal olmayan bir veri kümesinde, SVM'ler doğrusal bir hiper düzlem çizemez. Bu nedenle çekirdek numaraları kullanılır. Kernel yöntemi, doğrusal olmayan verilerdeki makine öğrenimini büyük ölçüde artırır. Kernel yönteminde SVM tahminçisi (y) süreci şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = (\mathbf{K}_{xi} \cdot \mathbf{W}_{jk}) + b \quad (1)$$

Denklem (1)'de b, SVM ağının bias terimidir ve  $\mathbf{W}_{jk}$  ağırlık vektörü olarak adlandırılır.  $\mathbf{K}_{xi}$ , giriş vektörlerini yüksek boyutlu bir özellik alanına eşleyen doğrusal olmayan bir işlevdir. Bu çalışmada kullanılan üç katmana sahip SVM modelinin yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Bu örnek SVM modeli için çıktı değeri, girişlerdeki üç ürününün toplamına ve Lagrange çarpanlarının bağımsız kombinasyonlarına eşittir. Bu çalışmada kullanılan doğrusal olmayan çekirdek fonksiyonları, Radyal temelli çekirdek fonksiyonu ve Poli çekirdek fonksiyonlarıdır.



Şekil 2.Çalışmada kullanılan SVM-1 modelinin yapısı

## Radyal Temelli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-RBF)

Lagrange çarpanları çıktı verileri için eğitim veri setlerinin önemini gösterir. Doğrusal olmayan radyal temelli çekirdek fonksiyonu (Hsu vd, 2003) aşağıdaki denklemle gösterilmiştir.

$$K_{xi} = e^{-\gamma \|p_i - y_i\|^2} \quad \gamma > 0 \quad \text{and} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Burada  $\gamma$  kullanıcı tanımlı bir parametredir.

## Poli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-PK)

Poli çekirdek fonksiyonu (Hsu vd, 2003) tarafından aşağıdaki denklemle gösterilmiştir.

$$K_{xi} = (p \cdot y + c)^d \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

## M5 Karar Ağacı Yöntemi (M5T)

Bir karar ağacı, bir bağımlı değişkenin değerinin tahminini bağımsız değişken kümesinin değerlerini kullanarak nasıl tahmin edilebileceğini gösteren bir ikili (iki yönlü bölünmüş) ağaç olarak gösterilen mantıksal bir modeldir. Temel olarak iki tür karar ağacı vardır:

(1) sınıflama ağaçları en yaygın olanıdır ve bir sayısal niteliğin değerini tahmin etmek için kullanılan bir sembolik sınıftır.

(2) regresyon ağaçları öngörmek için kullanılır. (Witten ve Frank, 2005).

Ağaçtaki her yaprak, o yapraktaki hedef değişkeni tahmin etmek için kullanılan doğrusal bir regresyon modeli içeriyorsa, o zaman bir model ağacı denir.

M5 karar ağacı algoritması orijinal olarak Quinlan (1992) tarafından geliştirildi. Bu tekniğin detaylı açıklaması Witten ve Frank (2005)'de bulunabilir. Bu tekniğin kısa bir açıklaması aşağıdaki gibidir. M5 algoritması, hedef boşluğundaki varyansı maksimuma indiren tek bir öznelik üzerinde testler kullanarak örnek boşluğunu yinelemeli olarak bölerek bir regresyon dizisi oluşturur. Standart

sapma azaltma (SDR) hesaplamak için matematiksel formül:

$$SDR = sd(T) - \sum I \frac{T_i}{T} sdIT_i \quad (4)$$

burada T düğüme ulaşan bir örnek grubunu,  $T_i$  potansiyel kümenin sonucu olan örneklerin alt kümesini ve  $sd$  standart sapmayı temsil eder. Ağaç büyütüldükten sonra, o düğüm ile ilgili verileri ve o düğümün alt testindeki testlere katılan tüm nitelikleri kullanarak her iç düğüm için doğrusal bir çoklu regresyon oluşturulur. Bundan sonra, her bir alt ağaç budama probleminin üstesinden gelmek için budama işleminde dikkate alınır. Budama, bir alt ağacın kökündeki doğrusal model için tahmini hata alt ağaç için beklenen hataya eşit veya daha küçük olduğunda oluşur. Son olarak, budama ağacının yapraklarındaki bitişik doğrusal modeller arasındaki keskin süreksizlikleri telafi etmek için yumuşatma işlemi kullanılır.

## Bulgular ve Tartışma

Yağış-akış ilişkisi tahin etmek için yapılan bu çalışmada, istasyondan toplam 731 günlük veri toplanmıştır. Bu verilerin 550 adedi yani %75'i eğitim sürecinde kalan 181 adedi ise test aşamasında kullanılmıştır. Radyal Temelli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-RBF), Poli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-PK) ve M5 Karar Ağacı Yöntemleri (M5T) yöntemleri kullanılarak tahminler yapılmıştır. Her üç modelde de üçer adet değerlendirme yapılmıştır. Modellerin tahmin sonuçları  $R^2$  (Determinasyon Katsayısı), Ortalama Mutlak Hata (OMH) ve Ortalama Karesel Hata (OKH) kriterlerine göre karşılaştırılmıştır.

SVM RBF 1, SVM PK 1 ve MP5 1 modellerinde girdi olarak Ortalama sıcaklık (T), Yağış (P), 1 gün ötelemeli Akış ( $Q_{t-1}$ ), SVM RBF 2, SVM PK 2 ve MP5 2 modellerinde girdi olarak Ortalama sıcaklık (T), Yağış (P), 1 gün ötelemeli Yağış ( $P_{t-1}$ ) 1 gün ötelemeli Akış ( $Q_{t-1}$ ), SVM RBF3, SVM PK 3 ve MP5 3 modellerinde Ortalama sıcaklık (T), Yapış (P), 1 gün ötelemeli Yağış ( $P_{t-1}$ ) 1 gün ötelemeli Akış ( $Q_{t-1}$ ), ve 2 gün ötelemeli akış ( $Q_{t-2}$ ), kullanılarak akış tahmini yapıldı. Oluşturulan

modeller arasında en iyi sonucu 3 numaralı modeller vermiştir. Modellerin uyumlulukları ve istatistiksel olarak hata değerleri Tablo 1'de gösterildiği gibidir

Tablo 1. Modellere göre sonuçların uyumluluk ve istatistiksel hata değerleri

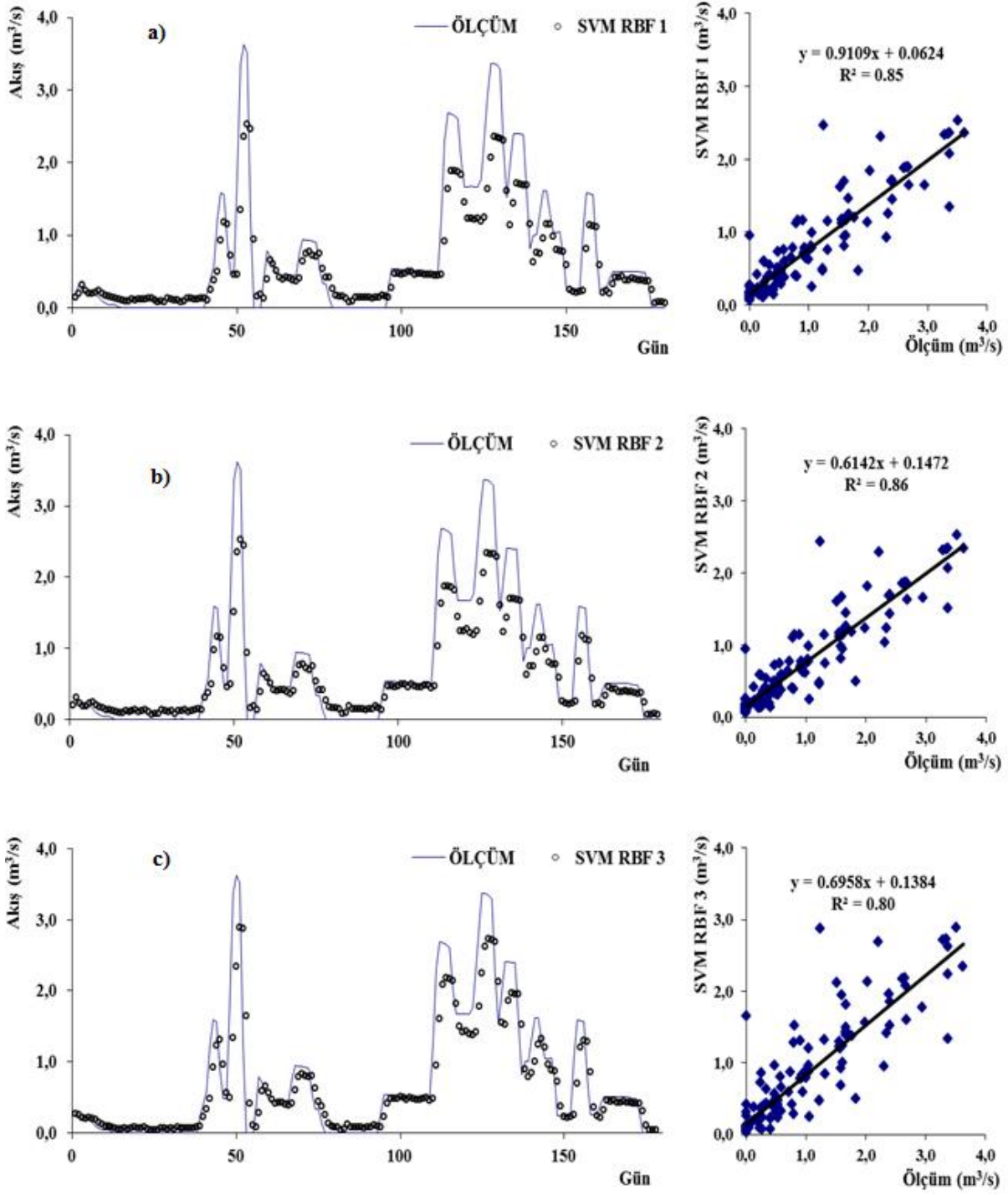
MODEL	GİRDİ	OMH	OKH	R <sup>2</sup>
SVM RBF 1	$P, T, Q_{t-1}$	0.2754	0.1932	0.85
SVM RBF 2	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}$	0.2747	0.1891	0.86
SVM RBF 3	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}, Q_{t-2}$	0.253	0.183	0.80
SVM PK 1	$P, T, Q_{t-1}$	0.156	0.122	0.85
SVM PK 2	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}$	0.158	0.120	0.86
SVM PK 3	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}, Q_{t-2}$	0.142	0.090	0.89
M5T 1	$P, T, Q_{t-1}$	0.190	0.112	0.86
M5T 2	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}$	0.186	0.099	0.88
M5T 3	$P, P_{t-1}, T, Q_{t-1}, Q_{t-2}$	0.175	0.072	0.91

Tüm modellerin performans değerlendirmesinde determinasyon katsayısı (R<sup>2</sup>), ortalama mutlak hata (OMH) ve ortalama karesel hataya (OKH) göre yapılmıştır. Test verilerinden elde edilen OMH, OKH ve R<sup>2</sup> nin karşılaştırma parametreleri Tablo 1'de gösterilmektedir. Tablodaki sonuçlar, modellerin tahmin performansını ve gözlem verileri ile karşılaştırmak için kullanılmıştır. Oluşturulan üç modelin gerçek veriler ile olan ilişkilerini gösteren dağılım ve saçılım grafikleri SVM RBF için Şekil 3'de, SVM PK için ise Şekil 4'de, M5T için de Şekil 5'de gösterilmiştir.

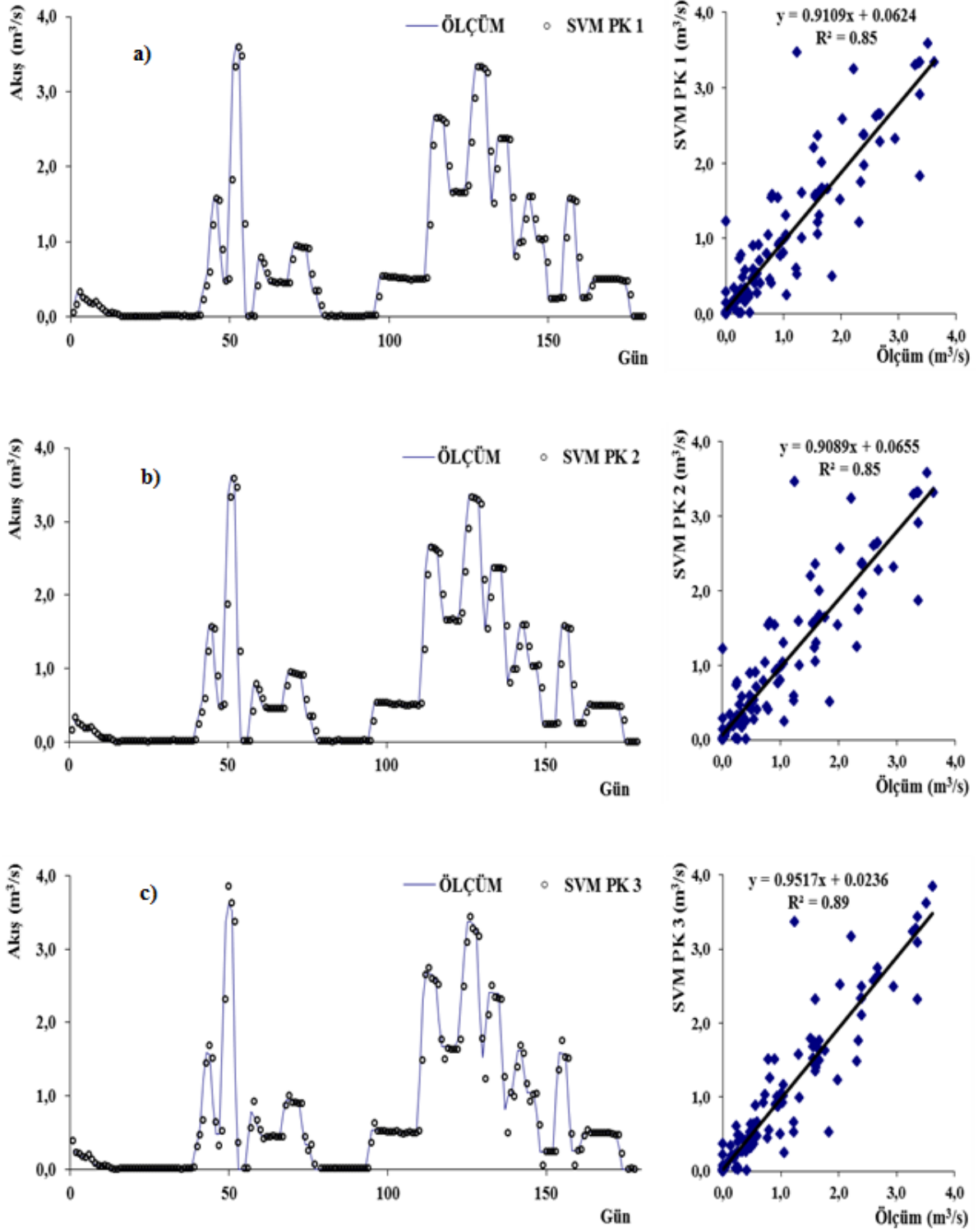
Şekil 3'de, SVM RBF modellerine bakıldığında korelasyon katsayısının yüksek olduğu ve yağış-akış tahminlerinin gerçek değerlere yakın olduğu görülmektedir. SVM RBF3 modeli, Tablo 1'de gösterilen edilen OMH, OKH ve R<sup>2</sup> (0.253, 0.183, 0.80) kriterlerine göre düşük hata, yüksek korelasyon göstermiş ve diğer SVM RBF modellerine göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

SVM PK modelleri için, dağılım ve saçılma grafikleri, Şekil 4'de gösterilmiştir. Test verileri için dağılım grafikleri analiz edildiğinde, SVM PK model sonuçları SVM RBF modellerine göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmüştür. SVM PK3 modeli tahmini değerleri de gerçek değerlere yakındır. Determinasyon katsayısı en yüksek SVM PK 3 modelinde R<sup>2</sup> = 0.89 olarak elde edildi. SVM PK 3 model sonucu OMH, OKH ve R<sup>2</sup> (0.142,0.090, 0.89) kriterlerine göre diğer SVM PK ve SVM RBF modellerine kıyasla daha iyi performans göstermiştir.

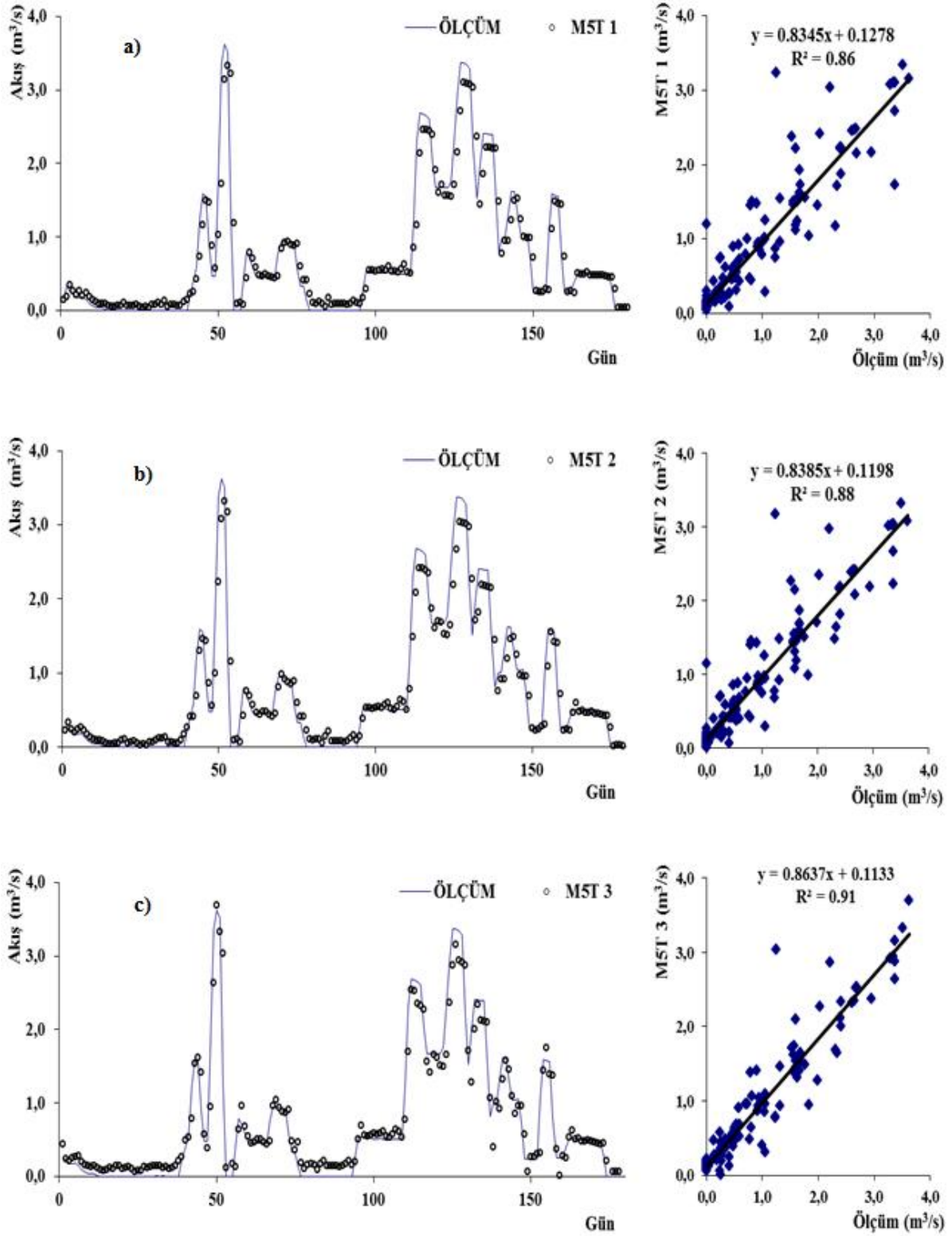
M5T modelleri için 731 günlük veriler değerlendirilmiş ve sonuçlar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. M5T modellerinin dağılım ve dağılım grafikleri, Şekil 5'de gösterilmektedir. Determinasyon katsayısı R<sup>2</sup> = 0.91 olarak elde edildi. Dağılım ve saçılım şekilleri incelendiğinde, tahmini değerler gerçek değerlere yakındır ve Tablo 1'de gösterilen OMH, OKH ve R<sup>2</sup> (0.175-0.072-0.91) kriter değerlerine baktığımızda, M5T 3 model sonucu, diğer M5T, SVM RBF ve SVM PK modellerine göre daha iyi sonuç göstermiştir.



Şekil 3. SVM RBF modelleri için dağılım ve saçılım diyagramları a) SVM RBF 1 b) SVM RBF 2 c) SVM RBF 3



Şekil 4. SVM PK modelleri için dağılım ve saçılım diyagramları a) SVM PK 1 b) SVM PK 2 c) SVM PK 3



Şekil 5. MST modelleri için dağılım ve saçılım diyagramları a) MST 1 b)MST 2 c) MST 3

## Sonuçlar

Bu çalışmada, Stony Brook Rezervuarı havzasında bulunan 01104480 numaralı gözlem istasyonuna ait 731 günlük yağış, akış ve sıcaklık verileri Radyal Temelli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri(SVM-RBF), Poli Çekirdek Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-PK) ve M5 Karar Ağacı (M5T) metodlarında girdi olarak girilip yeni akış değerleri tahmin edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile gerçek sonuçlar karşılaştırılarak modeller arasındaki ilişki incelenmiştir. Modelleme sırasında 731 adet verinin %75'i eğitim aşamasında, kalan %25'i ise test aşamasında kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarda Poli Çekirdekli Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-PK) yönteminin, Radyal Temel Fonksiyonlu Destek Vektör Makineleri (SVM-RBF) yöntemine göre daha az hatayla gerçeğe daha yakın sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür.

Tüm modelleri karşılaştırdığımızda M5 Karar Ağacı (M5T) modellerinin yağış-akış ilişkisi tahmininde SVM modellerine daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Düşük miktardaki hata (OMH, OKH) oranları ve yüksek determinasyon katsayısına ( $R^2$ ) göre M5T 3 modelinin en iyi performans sağladığı görülmüştür.

## Kaynaklar

- Asefa, T., Kemblowski, M., Lall, U., Urroz, G. (2005). Support vector machines for nonlinear state space reconstruction: Application to the Great Salt Lake time series. *Water resources research*, 41(12).
- Bhattacharya, B., Solomatine, D. P. (2005). Neural networks and M5 model trees in modelling water level–discharge relationship. *Neurocomputing*, 63, 381-396.
- Bray, M., Han, D. (2004). Identification of support vector machines for runoff modelling. *Journal of Hydroinformatics*, 6(4), 265-280.
- Chen, H., Guo, J., Xiong, W., Guo, S., Xu, C. Y. (2010). Downscaling GCMs using the Smooth Support Vector Machine method to predict daily precipitation in the Hanjiang Basin. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(2), 274-284.

- Cortes, C., Vapnik, V. (1995). Machine learning. *Support vector networks*, 20, 273-297.
- Demirci M., Baltacı A. (2013), Prediction of suspended sediment in river using fuzzy logic and multilinear regression approaches. *Neural Computing and Applications*, 23(1), 145-151.
- Demirci M., Unes F., Saydemir S. (2015a), Suspended sediment estimation using an artificial intelligence approach. *Sediment Matters*, Springer, 83-95.
- Demirci M., Unes F., Aköz M.S. (2015b), Prediction of cross-shore sandbar volumes using neural network approach. *Journal of Marine Science and Technology*, 20(1), 171-179.
- Demirci M., Unes F., Aköz M.S. (2016), Determination of nearshore sandbar crest depth using neural network approach. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12), 133-140.
- Demirci M., Tasar B., Kaya Y.Z., (2018), Estimation of Groundwater Level Fluctuations Using Neuro-Fuzzy and Support Vector Regression Models. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.* 5, 206–211. doi:10.22161/ijaers.5.12.29
- Demirci, M., Unes, F., Kaya, Y. Z., Tasar, B., Varcin, H. (2018). Modeling of dam reservoir volume using adaptive neuro fuzzy method. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, 145-152.
- Dibike, Y. B., Velickov, S., Solomatine, D., Abbott, M. B. (2001). Model induction with support vector machines: introduction and applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(3), 208-216.
- Ergezer, H., Dikmen, M., Özdemir, E. (2003). Yapay sinir ağları ve tanıma sistemleri. *PiVOLKA*, 2(6), 14-17.
- Fernando, D. A. K., Jayawardena, A. W. (1998). Runoff forecasting using RBF networks with OLS algorithm. *Journal of hydrologic engineering*, 3(3), 203-209.
- Hamidi, N. ve Demirci, M., (2006). "Yapay Sinir Ağları ve Regresyon Teknikleri ile Botan Çayı Aylık Taşınan Sediment Miktarının Modellenmesi". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt.21, No.1–2 (Haziran-Aralık), 193–207, Adana.
- Hamidi, N. and Kayaalp, N., (2008). "Estimation of the Amount of Suspended Sediment in the Tigris River using Artificial Neural Networks". *CLEAN-Soil, Air, Water*, 36(4), 380–386.
- Hosseini, S. M., Mahjouri, N. (2016). Integrating support vector regression and a geomorphologic artificial neural network for daily rainfall-runoff modeling. *Applied Soft Computing*, 38, 329-345.
- Hsu, C. W., Chang, C. C. Lin, C. J. (2003) A practical guide to support vector classification. Tech. Report, Dept Computer Sci. & Info.

- Engng, National Taiwan University, Taiwan, China.
- Hsu, K. L., Gupta, H. V., Sorooshian, S. (1995). Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process. *Water resources research*, 31(10), 2517-2530.
- Kaya, Y. Z., Mamak, M., Unes, F. (2016). Evapotranspiration Prediction Using M5T Data Mining Method. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(12).
- Kaya, Y. Z., Üneş, F., Demirci, M., Taşar, B., Varçin, H. (2018). Groundwater Level Prediction Using Artificial Neural Network and M5 Tree Models. *Aerul si Apa. Componente ale Mediului*, 195-201.
- Khan, M. S., Coulibaly, P. (2006). Application of support vector machine in lake water level prediction. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(3), 199-205.
- Khalil, A. F., McKee, M., Kemblowski, M., Asefa, T., Bastidas, L. (2006). Multiobjective analysis of chaotic dynamic systems with sparse learning machines. *Advances in Water Resources*, 29(1), 72-88.
- Mason, J. C., Price, R. K., Tem'Me, A. (1996). A neural network model of rainfall-runoff using radial basis functions. *Journal of Hydraulic Research*, 34(4), 537-548.
- McCulloch, W. S., Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133.
- Minns, A. W., Hall, M. J. (1996). Artificial neural networks as rainfall-runoff models. *Hydrological sciences journal*, 41(3), 399-417.
- Nieto, P. G., Torres, J. M., Fernández, M. A., Galán, C. O. (2012). Support vector machines and neural networks used to evaluate paper manufactured using Eucalyptus globulus. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12), 6137-6145.
- Quinlan, J. R. (1992). Learning with continuous classes. In *5th Australian joint conference on artificial intelligence* 92, 343-348.
- Rao, M., Fan, G., Thomas, J., Cherian, G., Chudiwale, V., Awawdeh, M. (2007). A web-based GIS Decision Support System for managing and planning USDA's Conservation Reserve Program (CRP). *Environmental Modelling & Software*, 22(9), 1270-1280.
- Sattari, M. T., Pal, M., Apaydin, H., Ozturk, F. (2013). M5 model tree application in daily river flow forecasting in Sohu Stream, Turkey. *Water Resources*, 40(3), 233-242.
- Solomatine, D. P., Xue, Y. (2004). M5 model trees and neural networks: application to flood forecasting in the upper reach of the Huai River in China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(6), 491-501.
- Tasar B., Unes F., Demirci M., Kaya Y.Z. (2018), Yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak buharlaşma miktarı tahmini. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 9(1), 543-551.
- Tasar B., Kaya Y. Z., Varçin H., Unes 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), 79-84.
- Tripathi, S., Srinivas, V. V., Nanjundiah, R. S. (2006). Downscaling of precipitation for climate change scenarios: a support vector machine approach. *Journal of Hydrology*, 330(3-4), 621-640.
- Turhan, E., 2012. Seyhan Havzası'nın Yağış- Akış İlişkisinin Yapay Sinir Ağları Yöntemi ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Unes F. (2010a), Dam reservoir level modeling by neural network approach: a case study. *Neural Network World*, 4(10), 461.
- Unes F. (2010b), Prediction of density flow plunging depth in dam reservoirs: an artificial neural network approach. *Clean-Soil, Air, Water*, 38(3), 296-308.
- Unes F., Demirci M. (2015), Generalized Regression Neural Networks For Reservoir Level Modeling. *International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking*, 3, 81- 84.
- Unes F., Yildirim S., Cigizoglu H.K., Coskun H. (2013), Estimation of dam reservoir volume fluctuations using artificial neural network and support vector regression. *Journal of Engineering Research*, 1(3), 53-74.
- Unes 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.
- Unes F., Gumuscan F.G., Demirci M. (2017), Prediction of Dam Reservoir Volume Fluctuations Using Adaptive Neuro Fuzzy Approach. *EJENS*, 2(1), 144-148.
- Üneş, F., Demirci, M., İspir, E., Kaya, Y. Z., Mamak, M., Tasar, B. (2017). Estimation of Groundwater Level Using Artificial Neural Networks: a Case Study of Hatay-Turkey. In *Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Environmental Engineering. ICEE* (Vol. 10, pp. 1-6). Vilnius



Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property.

- Uneş F., Demirci M., Mertcan Z., Taşar B., Varçin H., Ziya Y. (2018a). Determination of Groundwater Level Fluctuations by Artificial Neural Networks . *Natural and Engineering Sciences*, 3(3), Supplement, 35-42.
- Uneş F., Doğan S., Taşar B., Kaya Y., Demirci M. (2018b), The Evaluation and Comparison of Daily Reference Evapotranspiration with ANN and Empirical Methods. *Natural and Engineering Sciences*, 3(3), Supplement, 54-64.
- Unes F., Bölük O., Kaya Y. Z., Tasar B., Varçin H. (2018c), Estimation of Rainfall-Runoff Relationship Using Artificial Neural Network Models for Muskegon Basin. *Journal of Engineering Research*.
- USGS.gov | Science for a changing world [WWW Document], n.d. URL <https://www.usgs.gov/>
- Vapnik, V. The Nature of Statistical Learning Theory; Springer: New York, NY, USA, 1995.
- Vapnik, V., Golowich, S., Smola, A. (1997) Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *In Advances in Neural Information Processing Systems*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, pp. 281–287.
- Witten, I.H., Frank, E. (2005). Data mining: Practical machine learning tools and techniques with java implementations, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.

## Estimation of rainfall-runoff relationship using support vector machines and M5 decision tree methods

### Extended abstract

*In terms of efficient use of water resources and prevention of disasters, rainfall runoff relation is very important.. In this study, the data obtained from USA Waltham Massachusetts Stony Brook Reservoir basin was used. Rainfall -Runoff relation was predicted with using Support Vector Machine (SVM) and M5 Decision Trees (M5T) Method.*

*The data were obtained from the Stony Brook River, which supplies the Stony Brook reservoir at 42 ° 21'20 "Latitude and 71 ° 15'56" Longitude near the Waltham Dam in the US state of Massachusetts in the United States. The Stony Brook basin has a drainage area of 61.8 km<sup>2</sup> and a storage capacity of 1,340,000 m<sup>3</sup>. Station data from 01104480 taken from the United States Geological Research Institute (USGS) contains 731 days of precipitation, flow and temperature information between 07.05.2011 and 07.05.2013.*

*In this study 731 data was collected to predict the rainfall-runoff relationship from the station. 550 of these data were used in the training phase, remaining 181 data were used in the test phase. Predictions were made by using Support Vector Regression with radial basis functions (SVM-RBF), Support Vector Regression with poly kernel (SVM-PK) and Decision Tree Methods (M5T). Three evaluations were made in all three models. Estimation results of the models were compared according to R<sup>2</sup> (Determination coefficient), Mean Absolute Error (MAE) and Mean Square Error (MSE) criteria.*

*Average temperature (T), Precipitation (P), 1 day shift Flow (Q<sub>t-1</sub>) were taken as input in SVM RBF 1, SVM PK 1 and MP5 1 models, average temperature (T), precipitation (P), lagged-1 day precipitation (P<sub>t-1</sub>), lagged-1 day flow (Q<sub>t-1</sub>) were taken as input in SVM RBF 2, SVM PK 2 and MP5 2 models, average temperature (T), precipitation (P), lagged-1*

*day precipitation (P<sub>t-1</sub>) lagged-1 days flow (Q<sub>t-1</sub>) and lagged-2 day flow (Q<sub>t-2</sub>) were taken as input in SVM RBF 3, SVM PK 3 and MP5 3 models. The best results were the models of model 3.*

*The results obtained were compared with the actual results. As a result of the study, it has been seen that Support Vector Regression with poly kernel (SVM-PK) method has less realistic results with less error than Support Vector Regression with radial basis functions (SVM-RBF)*

*It is seen that M5 Decision Tree (M5T) models have better performance in the predicting rainfall-runoff relationship than the all SVM models. The M5T 3 model provided the best performance according to the low amount of error (MAE, MSE) ratios and high determination coefficient (R<sup>2</sup>).*

**Keywords:** *Rainfall - Runoff, Prediction, Support Vector Machine, M5 Decision Tree*



# Kompozit deniz yapısının dalga kuvvetleri altında incelenmesi

**Engin GÜCÜYEN**

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa  
engin.gucuyen@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9971-8546, Tel: (236) 231 23 21

**Recep Tuğrul ERDEM\***

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Manisa  
tugrul.erdem@cbu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-8895-7602, Tel: (236) 231 23 26

Geliş: 25.03.2019, Revizyon: 29.04.2019, Kabul Tarihi: 28.05.2019

## Öz

Deniz yapıları tabana sabitlenmiş ya da yüzer şekilde tasarlanabilmektedirler. Günümüzde, yüzer yapıların kullanımı her derinlikte hizmet vermeleri nedeniyle hızla artmaktadır. Bu yapıların yüzmesini tabanda bulunan pontonlar sağlar. Bu çalışmada farklı malzemelerden üretilmiş iki farklı pontonun dalga kuvvetleri etkisinde nümerik analizi yapılmıştır. Yapılardan ilki (Model 1) dışı beton içi köpük olacak şekilde tasarlanmıştır. İkinci yapı ise sadece sert plastik malzeme kullanılarak tasarlanmıştır. Analizlerde Abaqus sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Yapının bulunduğu deniz ortamı ile arasındaki etkileşim çift yönlü akışkan-yapı etkileşim analizleri ile gerçekleştirilmiştir. Çift yönlü etkileşim analizinde Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (CEL) ile modelleme yapılmıştır. Etkileşim modellemesinde diğer modelleme tekniklerinden farklı olarak herhangi bir yüzey tanımlanmamıştır. Etkileşim sadece genel temas özellikleri tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu tip modellemede (CEL) sadece Abaqus/Explicit çözücüsü kullanılmaktadır. Deniz ortamı Eulerian, yapı ise Lagrangian yaklaşımı ile modellenmiştir. Deniz ortamının modellemesinde Lineer dalga hız profili kullanılmıştır. Çözüme en uygun nokta ve eleman sayılarının belirlenmesi için hassaslık analizleri yapılmıştır. Hassaslık analizleri modal davranış üzerinden gerçekleştirilmiştir. Nümerik modelin tahkiki dalga su yüzü profilleri üzerinden yapılmıştır. Zamanla değişen su yüzü profilleri iki farklı noktada analitik ve nümerik olarak elde edilmiştir. Analitik ve nümerik dalga profillerinin uyumu sayısal ve görsel olarak tespit edilmiştir. Yapısal analizde ise modal davranışlar, frekanslar ve gerilme dağılımları elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda farklı bir akışkan-yapı etkileşim tekniği kullanılması durumunda kullanılacak nokta ve eleman sayıları elde edilmiştir. Bu değerlerin çözüme etkisi süre ve bellek gereksinimi açısından tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkan-yapı etkileşimi; Nümerik analiz; Eulerian-Lagrangian yaklaşımları; Yüzer yapılar

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Dünyanın artan nüfusuyla beraber enerjiye olan ihtiyaç da artmıştır. Karadaki fosil yakıt rezervlerinin azalması, arsa maliyetlerinin artması gibi nedenlerle enerji elde etme ve depolama tesislerinin inşası açık denizlerde artmaktadır. Fosil yakıtların yanında dalga ve rüzgar gibi temiz enerji üretimi için açık denizler iyi birer inşaat alanı haline gelmiştir. Enerji tesislerinin yanında deniz ve hava ulaşım tesisleri için de açık deniz yapıları kullanılmaktadır. Bu yapılar deniz tabanına sabitlenmiş ya da yüzer olarak hizmet verirler.

Yüzer yapılar, her derinlikte; sığ suda, geçiş bölgesinde ve derin suda kullanılabilirler. Nedeniyle günümüzde yaygınlaşmaktadır. Bu yapıların yüzmesini alt yapısında bulunan pontonlar sağlar. Pontonlar suya tam batık ya da yarı batık hizmet verirler. Bu iki durumda da platform altyapısı (Han vd., 2017), dalgakıran (Christensen vd., 2018, Loukogeorgaki vd., 2017), dalga enerjisi üretici (Zhang vd., 2018, Huang vd., 2019), balık çiftliği iskelesi (Hung vd., 2011), köprü (Sha vd., 2018) ve açık deniz bariyer yapısı (Aboshio ve Ye, 2016) uçak-helikopter pisti, eğlence alanı ve iskele olarak kullanılabilirler. Deniz tabanına sabitlenmiş yapılardan farklı olarak su derinliğinden ve deniz taban etkilerinden etkilenmezler ve deniz akıntısını engellemedikleri için daha çevrecidirler. Kolay yerleştirme, geniş yüzey alanı, yük taşıma kapasitesi ve başka yerde kullanılabilecek diğer olumlu özellikleridir (Chunyan vd., 2018). Olumlu yanlarının yanında karşılaşılabilecek olumsuzluklar Gao vd., 2013, Loukogeorgaki vd., 2014 tarafından açıklanmıştır. Geniş yüzeylerine karşılık kalınlıklarını az olması nedeniyle dalga kuvveti altında esneyip eğilmeye maruz kalabilirler. Şiddetli fırtına anında ani iniş kalkmalar nedeniyle kopma kırılma gibi durumlarla karşılaşılabilir.

Yüzer açık deniz yapılarına etki eden başlıca çevresel kuvvet dalga kuvvetidir. Sabit deniz yapılarında ihmal edilebilen düşey yönlü dalga

kuvveti bu tip yapıların hesabında etkin bir rol oynar. Bunun yanında deniz taban etkilerinden etkilenmedikleri için bu tip yapılarda akıntı kuvvetleri göz ardı edilebilir. Diğer deniz yapılarında olduğu gibi, yapıya etki eden dalga kuvvetinin hesaplanmasında Difraksiyon Teorisi (Chen vd., 2017) ya da Morrison Denklemi kullanılır (Maa vd., 2018, Zhao vd., 2016). Morrison Denklemi ana parametresi olan dalga hızının hesaplanmasında en genel olarak; Lineer, Stokes ve Cnoidal dalga teorileri kullanılır.

Açık deniz yapılarının, dinamik davranışının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri akışkan-yapı etkileşim analizidir. Sadece akışkandan yapıya kuvvet aktarımı olduğunda analiz tek yönlüdür. Akışkandan kuvvet, yapıdan da deplasman aktarımı olduğunda çift yönlü analiz yapılmış olur. Her iki tipte de sonlu elemanlar yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir. Sonlu elemanlar destekli akışkan-yapı etkileşim analizleri sadece Eulerian yaklaşımı (Martínez vd., 2009), sadece Lagrange yaklaşımı (Gücüyen ve Erdem, 2016) ya da ikisinin birlikte kullanıldığı Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) (Korobenko vd., 2017, Liu, 2016) ve Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (Coupled Eulerian Lagrangian-CEL) (Aboshio ve Ye, 2016, Ji vd., 2017) ile gerçekleştirilir. Etkileşim modellerinde kullanılan sonlu eleman yazılımlarından biri de Abaqus'tür (Dassault Systemes, 2010). ALE ve CEL analizlerinde yapı Lagrangian akışkan ise Eulerian yaklaşımları ile modellenir. Bu iki yaklaşımda etkileşim yüzeyi tanımlanmaması ve co-simulation kullanılmaması sadece Lagrangian ya da sadece Eulerian yaklaşıma göre avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, ALE yaklaşımında meydana gelen yapısal eleman deformasyonları, analizlerde gerçek dışı sonuçlara neden olabilmektedir. (Aquelet vd., 2006). CEL yöntemi, Abaqus programında uygulanan, belirgin bir integrasyon düzeni kullanan ve salt Lagrangian, Eulerian

yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldıran bir yöntemdir. CEL yöntemi, Eulerian malzemenin akış halinde olduğu ve Lagrangian kısımla etkileşim içinde olduğu cismin hacmini temsil eden Eulerian mesh yapısından oluşur. CEL yönteminde akış hareketi, Eulerian ağ yapısına uygun olarak, malzemenin sisteme doğru akışı ile tanımlanmaktadır. Bunun yanında, yüzer yapı Lagrangian hareket ifadesine uygun olarak tanımlanır ve ayrıklaştırılırsa, sayısal ağ yapısı malzeme ile birlikte hareket eder ve deforme olur (Aboshio ve Ye, 2016, Ducobu vd., 2013).

Beton, çelik, polyethylene, plexiglass, köpük ve perspex bu tip yapıların imalatında kullanılmaktadır. Bunların içinde beton ve çelik malzemelerinden ilki, dinamik yükler altında ve şiddetli deniz ortamında narinlik, ikincisi ise deniz suyunun oluşturacağı aşındırıcı etki ile başa çıkmak zorundadır. Uygulamada beton yapılar için, dalga kıran elemanlar arasında çarpma etkisinden kaçınmak için belli bir mesafe bırakılmalıdır. Çelik yapılar için ise, korozyon etkisi ciddi bir problemdir (Loukogeorgaki vd., 2017, Yanga vd., 2018).

Yapılan literatür araştırmalarında ponton tipi açık deniz yapılarının dinamik davranışının modellenmesinde analitik (Ning vd., 2017),



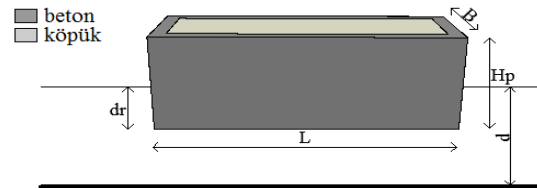
Şekil 1.a. Kullanımdaki yapı

Şekil 1.a'da onarım için kıyıya çekilmiş yapı görülmektedir. Şekil 1.b'de kompozit yapı görülmektedir. Köpüğün dış etkilerden korunması için köpük, 0.10 m kalınlığında beton ile kaplanmıştır. Şekil 1.c'de ise tek bir

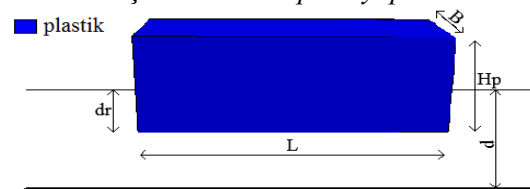
nümerik (Zhan vd., 2017, Haicheng vd., 2018) ve deneysel (Ji vd., 2017) yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmada, farklı malzemelerden üretilmiş ponton tipi açık deniz yapılarının dalga kuvveti etkisinde dinamik davranışı nümerik olarak incelenecektir. Nümerik analizde ise CEL yaklaşımı Abaqus ile uygulanacaktır. Yapı Lagrangian, çevresini oluşturan deniz ortamı ise Eulerian yaklaşımı ile modellenecektir. Kullanılan farklı malzemelerin yapısal davranış üzerindeki etkileri nümerik analiz üzerinden incelenecektir. Farklı noktalarda nümerik olarak elde edilen su yüzü profili ile analitik olarak elde edilen su yüzü profillerinin uyumu tahkik edilecektir.

### İncelenen yapı ve deniz ortamı

İnşaat teknolojilerinde ki gelişmelerle beraber, deniz yapıları her derinlikte inşa edilebilmektedir. Bu tanıma en uygun deniz yapısı ise ponton tipi yapılardır. Bu çalışmada, Şekil 1'de geometrisi görülen yapı iki farklı malzeme ile modellenerek davranışı incelenecektir. Birinci model içi köpük dışı ise beton koruma ile kaplanmış kompozit yapıdır. İkinci model ise sadece sert plastikten üretilmiştir.



Şekil 1.b. Kompozit yapı



Şekil 1.c. Tek bir malzemedden üretilmiş yapı

malzemedden üretilmiş yapı görülmektedir. Yapının geometrik özelliklerine ait sayısal değerler ve bulunduğu konuma ait çevresel değerler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Yapıya ve dalga ortamına ait geometrik değerler

Yapısal değerler				Çevresel değerler			
Hp (m)	B (m)	L (m)	dr (m)	H (m)	T (s)	d (m)	L (m)
1	0.70	3	0.40	1	6	6	56.18

Tablo 1’de, Hp ponton yüksekliğini, B ponton genişliğini, L ponton boyunu, dr yapının suyun içindeki yüksekliğini, H dalga yüksekliğini, T dalga periyodunu, d su derinliğini ve L dalga boyunu göstermektedir.

Her iki yapı modelinde dalgalanmamış su seviyesinde eşit miktarda battıkları varsayımı yapılmıştır. Bu dengeleme ikinci modelin içine doldurulan su ile gerçekleştirilmiştir (Yanga vd., 2018). Su ağırlığı ek ağırlık olarak Model 2’ye etki ettirilmiştir.

Yüzer yapılar hidrodinamik dalga kuvvetleri etkisi altında aniden yükselme ve yalpalama hareketlerine maruz kalmaktadır. Hidrodinamik kuvvetler, dalga hızına (u) ve ivmesine ( $\dot{u}$ ) bağlı olarak hesaplanır.

$$u = \frac{H g T \cosh[2\pi(z+d)/L_w]}{2 L_w \cosh(2\pi d/L_w)} \cos\left(\frac{2\pi}{L_w}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

Denklem (1) ile verilen hız değeri, dalga yüksekliğine (H), dalga periyoduna (T) ve yapının bulunduğu su derinliğine (d) göre seçilen dalga teorisine göre hesaplanır. Denklemde kullanılan dalga boyu ( $L_w$ ) değeri Lineer Dalga Teorisine göre 98.71 m olarak hesaplanmıştır. Dalga hızı numerik analizde giriş hızı olarak tanımlanır.

## CEL esaslı akışkan-yapı etkileşim analizi

Deniz yapılarının çevresel yükler altında davranışlarının belirlenmesinde akışkan-yapı etkileşim analizleri sıklıkla kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi bu analizler için kullanılan en yaygın yöntemdir. Bu çalışmada ponton tipi bir deniz yapısının akışkan-yapı etkileşim analizi sonlu elemanlar programlarından biri olan Abaqus ile gerçekleştirilecektir. Sonlu elemanlar analizinde

yapı Lagrange, akışkan Eulerian yaklaşımı ile modellenerek analiz CEL üzerinden sürdürülecektir. CEL yaklaşımının matematiksel ifadesi takip eden bölümde sunulmuştur.

## CEL formülizasyonunun matematiksel tanımı

Abaqus, aşağıda tanımlanan denklemler ile Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birleşimi (CEL) yöntemini kullanmaktadır. Denklemler (2-4) sırasıyla, kütle, momentum ve enerji korunum denklemleridir.

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} \quad (3)$$

$$\frac{De}{Dt} = \boldsymbol{\sigma} : \mathbf{D} \quad (4)$$

Denklemlerde, v malzeme hızı,  $\rho$  yoğunluk,  $\boldsymbol{\sigma}$  Cauchy gerilmesi, b cisim kuvveti ve e iç enerjinin birim hacme oranıdır.

$$\frac{D\varphi}{Dt} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot (\nabla \varphi) \quad (5)$$

Lagrangian yaklaşımı için yazılan korunum denklemleri Denklem (5) kullanılarak Eulerian yaklaşımı için genel formda aşağıdaki gibi elde edilir.  $\varphi$  ise rastgele seçilmiş çözüm değişkenidir.

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = S \quad (6)$$

Denklem (6)’da  $\Phi$  akış fonksiyonu, S ise kaynak terimidir. Bu denklem iki ayrı denklem şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = S \quad (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi = 0 \quad (8)$$

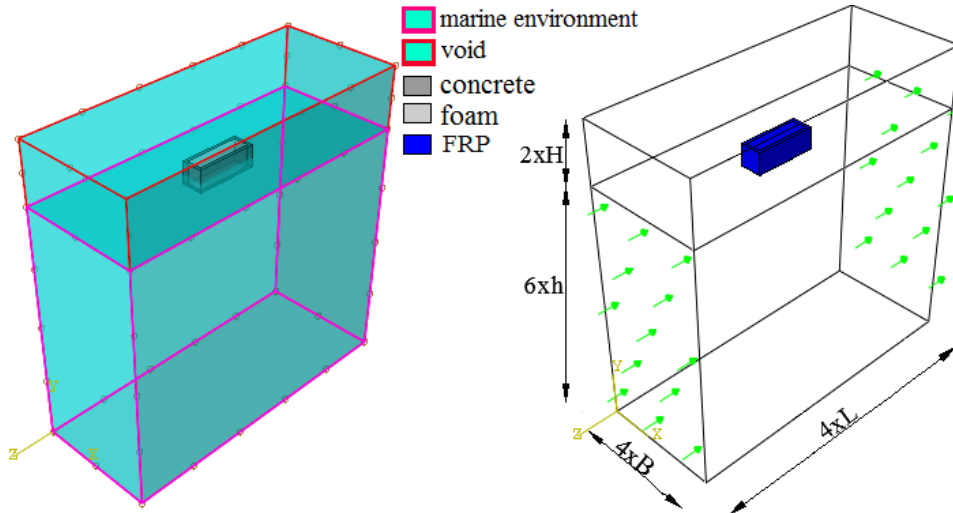
Denklem (7), konumsal zaman türevinin, malzemesel zaman türevi ile değişmesi durumunda, standart Lagrangian formulasyonu ile özdeştir. Denklem (8)'i çözmek için deforme olmuş ağ, orijinal sabit ağ pozisyonuna taşınmakta ve komşu elemanlar arasında taşınmış malzeme hacmi hesaplanmaktadır. Kütle, enerji, momentum, gerilme gibi Lagrangian çözüm değişkenleri komşu elemanlar arasındaki malzeme akışını tanımlayan algoritmalar ile tanımlanmaktadır. Bu anlatıma ek olarak, CEL formulasyonu hakkında daha fazla bilgi (Benson ve Okazawa, 2004, Reddy, 2010) çalışmalarında bulunmaktadır.

### Model üzerinde CEL uygulaması

CEL yöntemi, büyük deformasyonları içeren akışkan-yapı etkileşim uygulamalarında

geçerlidir. CEL yöntemi, her bir zaman artışında Lagrangian ve Eulerian ifadelerini içeren ağ bozukluklarında elverişlidir. Lagrangian aşamasında, düğümlerin geçici olarak malzemeye sabitlendiği ve elemanların malzeme ile birlikte şekil değiştirdiği varsayılmaktadır. Hangi elemanların önemli oranda deforme olduğu Lagrangian aşamasının sonunda belirlenmektedir. Eulerian aşamasında ise, büyük deformasyon yapan elemanlar otomatik olarak tekrar mesh işlemine tabi tutulur. (Liu vd., 2016).

Bu çalışmada, CEL yaklaşımının ponton modeline uygulanmasında Abaqus sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Analize ait model Şekil 2'de görülmektedir. Şekilin solunda köpük ve beton ile üretilen kompozit yapı görülürken, sağında ise sert plastik ile üretilen yapı görülmektedir. İki farklı yapı aynı geometrik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte yapıların bulunduğu deniz ortamı aynı geometrik ve malzeme özelliklerine sahiptir.



Şekil 2. CEL modelin şematik gösterimi

Şekil 2'de deniz ortamı ve içinde bulunan yapının sonlu elemanlar modeli görülmektedir. Şeklin solunda Eulerian partı oluşturan deniz ortamı ve Lagrangian partı oluşturan kompozit yapı görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi Eulerian part, malzeme atanmış ve malzeme atanmamış (void) kısımlardan oluşmaktadır.

CEL yöntemi, bir elemanda oluşan boşlukları da içeren çoklu malzemeleri desteklemektedir. Ağ boyunca akıcı malzeme, Eulerian elemanlar ile dolu olan malzeme sayesinde Eulerian Volume Fractions (EVF) yöntemiyle izlenmektedir. Eğer bir malzeme, elemanı tamamen dolduruyorsa EVF 1, eleman içinde malzeme yoksa EVF 0

olarak alınmaktadır. Şekil 2'nin sağında Lagrangian kısma göre belirlenen Eulerian kısmının boyutları görülmektedir.  $4L \times 4B \times 6h$  boyutları uzak alan etkilerini ortadan kaldıracak şekilde belirlenmiştir (Liang ve Tao, 2017, Ren vd., 2017).

Eulerian ve Lagrangian kısımlar oluşturulduktan sonra bu kısımlara ilgili malzemeler atanır. Yapı

modellemesinde köpük, beton ve plastik malzeme özellikleri kullanılırken, deniz ortamı modellemesinde deniz suyuna ait malzeme özellikleri kullanılmıştır. Deniz suyu EOS malzeme olarak tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Eulerian ve Lagrangian kısımlar için malzeme özellikleri

Lagrangian kısım			Eulerian kısım		
	Beton	Köpük	Plastik	Tuzlu su	
Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	2400	30	1190	Yoğunluk ( $\text{kg/m}^3$ )	1025
Elastisite modülü ( $\text{N/m}^2$ )	$32 \times 10^9$	$15 \times 10^5$	$3.0 \times 10^9$	Dinamik viskozite ( $\text{Ns/m}^2$ )	$1.50 \times 10^{-3}$
Poisson oranı	0.20	0.10	0.46	Su içinde sesin hızı (m/s)	1560

Oluşturulan modele malzeme ataması yapıldıktan sonra çözümlenmede kullanılacak yükleme durumu ve sınır şartları belirlenir. Şekil 2'de Eulerian kısma ait akım yönleri görülmektedir. Denklem (1) ile verilen Lineer Dalga teorisine ait hız profili giriş yüzeyine tanımlanır. Çıkış yüzeyinde ise herhangi bir tanımlama yapılmaz ve parametreler program tarafından belirlenir. Tabanda ve yan yüzeylerde yüzeye dik hız bileşenleri sıfır alınarak sınır şartları tanımlanmıştır. Tüm modele ise  $g=9.81 \text{ m/s}^2$  yer çekimi etki ettirilmiştir. Yapının y yönünde deplasmanına, x yönünde ise dönmesine izin verilmiştir.

### Ağ tasarımı

Modellemede kullanılacak en uygun nokta ve eleman sayılarını belirlemek için artan ya da azalan nokta ve eleman sayıları ile ön analizler yapılır. Belirlenen bir sonuç parametresi için değişen nokta ve eleman sayıları ile analizler gerçekleştirilir. Sonuçların birbirine yaklaştığı nokta ve eleman sayısı model için en uygun nokta ve eleman sayısı olarak belirlenir. Yapılan

ön analizlere hassaslık analizi denilmektedir. Bu çalışmada hassaslık analizi, doğal frekans değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar modeli, Denklem (8)'deki matrisler ile verilmiştir.

$$[k]\{X\} - \lambda[m]\{X\} = 0 \quad (8)$$

Denklemde, k ve m sırasıyla rijitlik ve kütle matrisleridir.  $\lambda$  doğal frekansın karesi, X ise yapının deplasmanıdır. Sonlu elemanlar programı Denklem (8)'in çözümünde Lanczos Yöntemini kullanmaktadır.

Artan nokta sayısına karşılık gelen doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Frekans değerlerinin değişmediği nokta sayısı, ideal nokta sayısıdır. Tablo 3'te, değişen nokta ve eleman sayılarına karşılık gelen doğal frekans değerleri verilmiştir. Modellemede CEL analizine uygun C3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır.

**Tablo 3.** Model 1'e ait hassaslık analizi sonuçları

Noktalar arası uzaklık (m)	0.15	0.10	0.075	0.05	0.025
Düğüm sayısı	546	1344	3210	9225	68904
Eleman sayısı	360	980	2556	7840	63476
Doğal frekans (rad/s)	$7.671 \times 10^{-4}$	$1.272 \times 10^{-3}$	$1.549 \times 10^{-3}$	$1.560 \times 10^{-3}$	$1.563 \times 10^{-3}$

En uygun nokta ve eleman sayısını elde etmek için yapılan ön analiz sonuçlarına Tablo 3'te yer verilmiştir. Noktalar arası uzaklık 0.075'den

0.025'e azalırken modal analiz sonuçlarında önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre modelde kullanılan nokta



sıklığı 0.075 m olarak belirlenmiştir. Böylece kompozit yapı modelinde 3210 nokta ve 2556 eleman kullanılmıştır. Modelin Eulerian kısmını oluşturan deniz ortamında ise 80736 nokta ve EC3D8R tipinde 74727 eleman kullanılmıştır. Noktalar arası uzaklık ise 0.175 m'dir.

### Çözüm Yöntemi

CEL yöntemi, büyük deformasyonların olduğu akışkan yapı etkileşim problemlerini çözmekte kullanılmaktadır. Eulerian analizleri çok büyük deformasyonlar içeren akış problemlerinde etkilidir. Bu uygulamalarda, Lagrangian elemanları büyük oranda bozulmuş ve hassasiyetini kaybetmiş biçimdedir. Eulerian-Lagrangian teması, Eulerian malzemelerin doğrusal olmayan Lagrangian analizleri ile birleşmesine olanak sağlamaktadır.

Eulerian ve Lagrangian kısımların etkileşimi, Penalty kontak modeli ile tarif edilen genel temas algoritmaları ile sağlanır. Bu sayede, diğer akışkan-yapı etkileşim modellerinde olduğu gibi temas yüzeyi tanımlaya gerek kalmaz. Birleşik Eulerian-Lagrangian analizleri sadece dinamik Explicit yöntem ile gerçekleştirilir. Denklem (9)'un Explicit çözümü ile CEL yönteminde akışkana aktarılacak deplasmanlar elde edilir.

$$m^{NJ}\ddot{X}^N|_t = (F^J - I^J)|_t \quad (9)$$

Denklem (9)'da,  $m^{NJ}$  kütle matrisi,  $\ddot{X}$  ivme,  $t$  zaman,  $F^J$  akışkandan aktarılan dış yük vektörü ve  $I^J$  elemanlardaki gerilmelerden oluşan iç kuvvet vektörünü temsil etmektedir. Cisim için hareket denklemleri, Explicit kuralı için tanımlanan ve aşağıda verilen denklemlere göre oluşturulmaktadır.

$$\dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N = \dot{X}_{(i-\frac{1}{2})}^N + \frac{\Delta t_{(i+1)} + \Delta t_{(i)}}{2} \ddot{X}_i^N \quad (10)$$

$$X_{(i+1)}^N = X_{(i)}^N + \Delta t_{(i+1)} \dot{X}_{(i+\frac{1}{2})}^N \quad (11)$$

$$\ddot{X}_{(i)}^N = (m^{NJ})^{-1} (F_i^J - I_i^J) \quad (12)$$

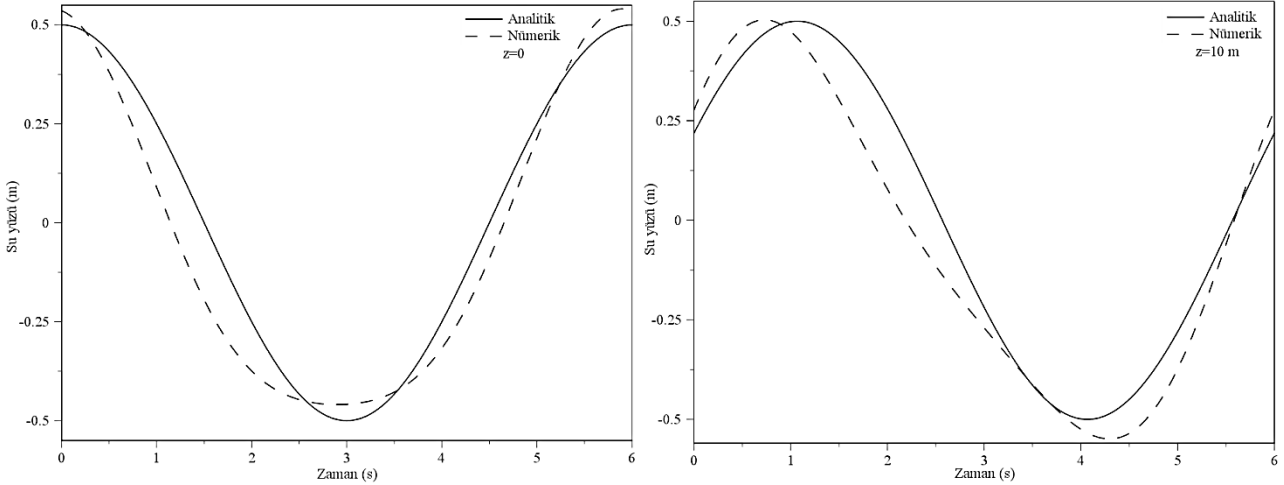
$X^N$ ,  $\dot{X}^N$  ve  $\ddot{X}$ , ( $N$ ) serbestlik derecesinde ki, sırasıyla, deplasman, hız ve ivme bileşenleridir. Hız ve deplasman değerleri, ivme değerlerinin hesaplanmasının ardından bulunur.

Bir sonraki zaman adımındaki bilinmeyen çözümü, herhangi bir iterasyon yapmadan önceki zaman adımının çözümü ile doğruca hesaplanabilir. Explicit integrasyon işlemleri koşullu kararlıdır. Nümerik olarak kararlılık, her bir zaman adımında kritik zaman artışı tanımlanarak sağlanır. Zaman artış büyüklüğü, malzemenin her bir artış adımında birden çok elemana akışını engelleyerek otomatik olarak uyumlu hale getirmektedir.

Sonlu elemanlar analizleri bir dalga periyodu süresi olan 6 s için 0.01s zaman adımıyla ( $\Delta t$ ) gerçekleştirilmiştir. Zaman artış deformasyonunun Eulerian aşamasında engellendiği sırada, büyük deformasyona sahip elemanlar otomatik olarak tekrar meshlenir komşu elemanlar arasındaki ve ilgili malzeme akışı hesaplanır. Hangi elemanların önemli oranda deforme olduğu ise Lagrangian aşama sonundaki her bir zaman artışı ile belirlenir. Eulerian aşama sırasında bu elemanların sıfır veya küçük deformasyon yaparak pasif durumda olmasına müsaade edilmesi, çözüm performansını artırmaktadır. Genel olarak, hareketsiz elemanların Eulerian analizde görsel olarak bir etkisi yoktur. Fakat çok büyük bir ölçek katsayısı kullanılması durumunda, deformasyon toleransı içinde kalan elemanlar için, Eulerian mesh yapısında az da olsa deformasyonlar gözlenebilir.

### Analiz Bulguları

Bu bölümde malzeme özellikleri bakımından farklılık gösteren iki yapının doğal frekans, ve gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bunun yanında analitik olarak elde edilen dalga profili ile nümerik olarak elde edilen dalga profilinin uyumu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Farklı konumlarda ki su yüzü profilleri

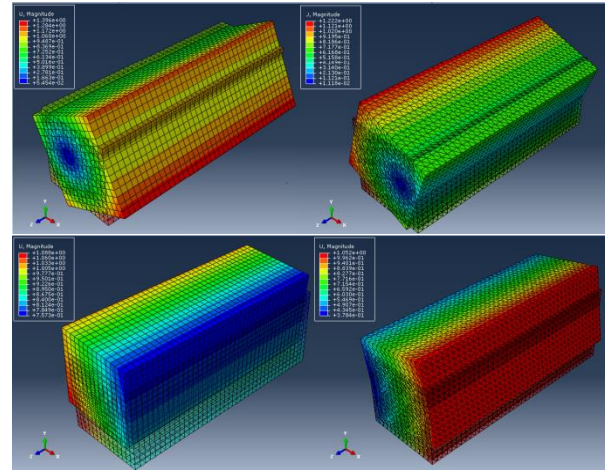
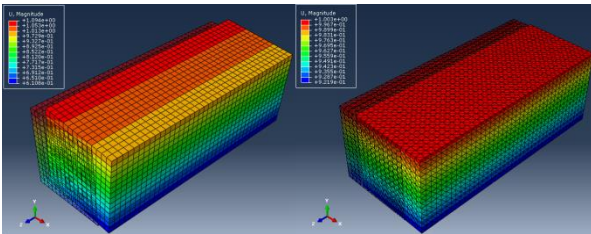
Şekil 3'te farklı konumlarda ki dalga su yüzü profilleri görülmektedir. Nümerik modelin boyutlarına göre belirlenen iki farklı konum için elde edilen değerler şekilde görülmektedir.

Tablo 4'te yapıların doğal frekans değerleri verilmiştir. Model 1 kompozit malzemeden üretilmiş, Model 2 ise sert plastik malzemeden üretilmiş yapıyı temsil etmektedir.

Tablo 4. İlk üç doğal frekans

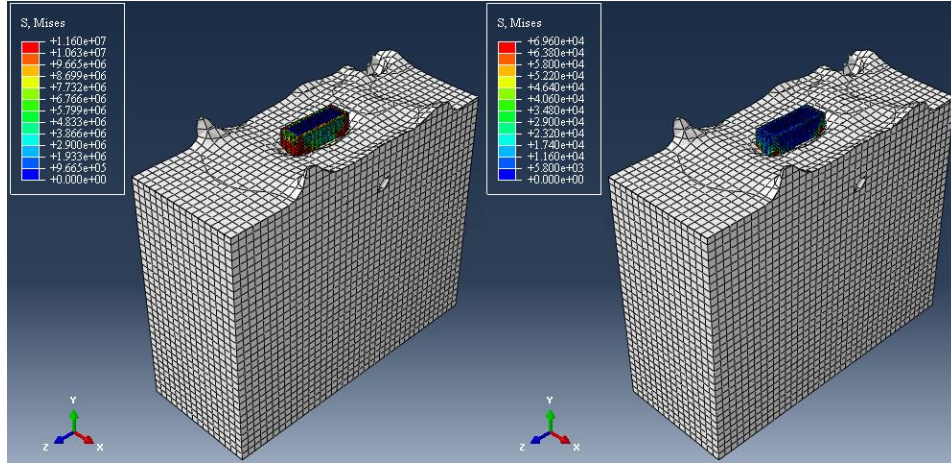
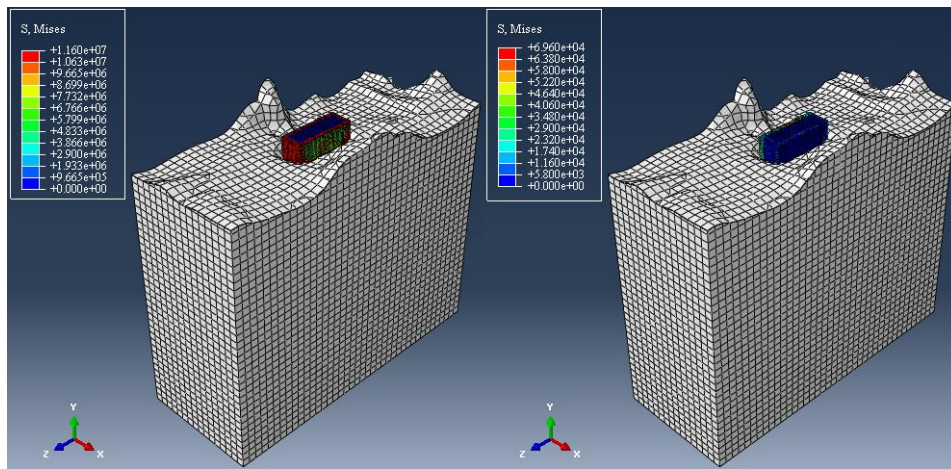
Model	$\omega_1$ (rad/s)	$\omega_2$ (rad/s)	$\omega_3$ (rad/s)
1	$1.549 \times 10^{-3}$	$1.922 \times 10^{-3}$	$2.525 \times 10^{-3}$
2	$5.661 \times 10^{-3}$	$8.482 \times 10^{-3}$	$1.074 \times 10^{-2}$

Tablo 4 ile verilen değerlerle ilgili mod şekilleri ise Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'ün solundaki mod şekilleri Model 1'e sağdakiler ise Model 2'ye aittir.



Şekil 4. Yapıların mod şekilleri

Şekil 5'te yapıların zamanla değişen gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 5'in solundaki gerilme dağılımları birinci modele, sağdaki gerilme dağılımları ise ikinci modele aittir. Şekil 5. a'da  $t=3$  s'de yapılarda oluşan gerilme dağılımları görülmektedir. Şekil 5. b'de ise  $t=5$  s'de yapılarda oluşan gerilme dağılımları görülmektedir.

Şekil 5.a.  $t=3s$ 'deki gerilme dağılımıŞekil 5.b.  $t=5s$ 'deki gerilme dağılımı

## Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada farklı malzeme özellikliklerine sahip, iki farklı yüzer yapının numerik analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde akış ortamını oluşturan dalga modeli Eulerian, yapılar ise Lagrangian yaklaşımı ile modellenmiştir. İki ortamın etkileşimi CEL yaklaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Çözümlemede Explicit çözücüsü kullanılmıştır.

İlk olarak numerik modelin tahkiki dalga su yüzü profili üzerinden gerçekleştirilmiştir. CEL yaklaşımı ile modellenen dalga serbest yüzeyinin hareketi numerik olarak elde edilmiştir. Ardından Linear dalga teorisine ait su yüzü profili denklemi kullanılarak serbest yüzey hareketi analitik olarak elde edilmiştir. Su yüzü profillerine ait sonuçlar Şekil 3'te görülmektedir.  $Z=0$  konumunda analitik olarak

elde edilen dalga profili  $+0.50$  ile  $-0.50$  aralığında salınım yapmaktadır. Aynı konumda numerik olarak elde edilen değer ise  $-0.44$  ile  $+0.54$  aralığındadır.  $Z=10$  m konumunda ise analitik sonuçlarda salınım  $+0.50$  ile  $-0.50$  aralığında iken, numerik sonuçlarda ise  $-0.53$  ile  $+0.51$  aralığındadır. Analitik sonuçlar ile numerik sonuçlar arasındaki fark maksimum % 12'dir. Su yüzü profillerinin uyumu gerek sayısal gerekse görsel olarak tahkik edilmiştir. Dalga profillerinin uyumu kontrol edilirken içine yapı yerleştirilmeden sadece dalga modeli oluşturulmuştur. Belirlenen iki noktada su yüzü profilleri elde edilmiştir. İçine yapı yerleştirilmesi durumunda akımın yapısı bozulacağı için analitik yöntemle karşılaştırma doğru sonuç vermeyecektir.

Yapıların ilk üç modu için elde edilen frekans değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Bu modlara

ait mod şekilleri ise Şekil 4'te görülmektedir. İki farklı yapının modal davranışlarının benzer olduğu görülmektedir.

Yapılar üzerinde oluşan Von-Mises gerilme dağılımları farklı zamanlar için elde edilmiştir. Model 1'in dış yüzeyini oluşturan beton kısımda gerilmeler yoğunlaşmış ve bu kısımda sınırlı kalmıştır Model 2'de ise gerilme dağılımı yapı üzerinde dağılım göstermiştir. Maksimum gerilme değeri Model 1'de  $1.160 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>, Model 2'de ise  $6.690 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup> olmuştur.

İki farklı yapı modal davranışlara göre incelendiğinde davranışların bir birine benzediği Şekil 4'te görülmektedir. Yapılar gerilmeler açısından incelendiğinde plastik malzemedan üretilen Model 2'nin daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ancak yıpratıcı ve bakımın zor olduğu deniz ortamı göz önünde bulundurulduğunda delinme, yırtılma gibi dış etkilere daha dayanıklı olan Model 1'in daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Sonlu elemanlar çözümlerinde kullanılan nokta ve eleman sayılarının, sonuçları ve çözüm süresini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada öncelikle en uygun nokta ve eleman sayıları belirlenmiştir. CEL yaklaşımına uygun olan elemanlar kullanılmıştır. Yapı için altı yüzlü (hexahedral), sürekli, üç boyutlu, 8 noktalı, 1 integrasyon noktalı (reduced integration) C3D8R tipinde, akışkan için ise aynı özelliklerde, EC3D8R tipinde elemanlar kullanılmıştır. Nokta ve eleman sayıları Tablo 3'te sunulmuştur. Aynı fiziksel problemin Eulerian-Lagrangian yaklaşım yerine sadece Lagrangian yaklaşımla çözülmesi durumunda kullanılacak nokta ve eleman sayıları değişecektir. Eleman tipi ise C3D10M olacaktır. Yapı modelinde noktalar arasında ki mesafe aynı kalmak şartıyla, 24740 nokta ve 16785 eleman kullanılacaktır. Artan nokta ve eleman sayılarının yanında akışkan ve yapı farklı ara yüzlerde modellenecektir. Ara yüzler arasında etkileşim tanımlanan temas yüzeyleri üzerinden sağlanacaktır.

Farklı ara yüz kullanılması, nokta ve eleman sayılarının artması bellek gereksinimlerini

arttırmaktadır. Artan bellek gereksinimleriyle birlikte çözüm süresi de artmaktadır. Bu nedenle, çalışmada kullanılan modele benzer akışkan-yapı etkileşim problemlerinde Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birlikte kullanılması çözümü kolaylaştıracaktır. Aynı zamanda, deformasyonların fazla olduğu etkileşim problemlerinde, Eulerian-Lagrangian yaklaşımlarının birlikteliğinin daha iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir.

## Kaynaklar

- Aboshio, A., Ye, J., (2016). Numerical study of the dynamic response of inflatable offshore fender barrier structures using the Coupled Eulerian-Lagrangian discretization technique, *Ocean Engineering*, 112, 265–276.
- Aquelet, N., Souli, M., Olovsson, L., (2006). Euler-Lagrange coupling with damping effects: application to slamming problems, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 195, 110–132.
- Benson, D.J., Okazawa, S., (2004). Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 193, 4277-4298.
- Chen, X., Miao, Y., Tang, X., Liu, J., (2017). Numerical and experimental analysis of a moored pontoon under regular wave in water of finite depth, *Ships and Offshore Structures*. 12:3, 412-423.
- Christensen, E.D., Bingham, H.B. Friis, A.P.S., Larsen, A.K., Jensen, K.L., (2018). An experimental and numerical study of floating breakwaters, *Coastal Engineering*, 137, 43–58.
- Dassault Systemes, Abaqus, Version 6.10 documentation, 2010.
- Ducobu, F., Riviere-Lorphevre. E., Filippi, E., (2016). Application of the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method to the modeling of orthogonal cutting, *European Journal of Mechanics A/Solids*, 59, 58-66.
- Gao, R.P., Wang, C.M. Koh, C.G., (2013). Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells, *Engineering Structures*, 52, 372–383.
- Gücüyen, E., Erdem, R.T., (2016). Açık deniz uzay kafes sistemin çevresel yükler altında akışkan-yapı etkileşimli analizi, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi mühendislik dergisi*, 7:3, 433-444.

- Loukogeorgaki, E., Lentsiou, E.N., Aksel, M., Yagci, O., (2017). Experimental investigation of the hydroelastic and the structural response of a moored pontoon-type modular floating breakwater with flexible connectors, *Coastal Engineering* 121, 240–254.
- Zhang, H., Xu, D., Zhao, H., Xia, S., Wu, Y., (2018). Energy extraction of wave energy converters embedded in a very large modularized floating platform, *Energy* 158, 317-329.
- Haicheng, Z., Daolin, X., Huai, Z., Shuyan, X., Yousheng, W., (2018). Energy extraction of wave energy converters embedded in a very large modularized floating platform, *Energy*, 158, 317-329.
- Han Y., Le C., Ding H., Cheng Z., Zhang P., (2017). Stability and dynamic response analysis of a submerged tension leg platform for offshore wind turbines, *Ocean Engineering*, 129, 68-82.
- Huang, S., Sheng, S., Gerthoffert, A., Cong, Y., Zhang, T., Wang, Z., (2019). Numerical design study of multipoint mooring systems for the floating wave energy converter in deep water with a sloping bottom, *Renewable Energy*, 136, 558-571.
- Ji, C., Cheng, Y., Yang, K., Oleg, G., (2017). Numerical and experimental investigation of hydrodynamic performance of a cylindrical dual pontoon-net floating breakwater, *Coastal Engineering*, 129, 1-16.
- Ji, C., Cheng, Y., Cui, J., Yuan, Z., Gaidai O., (2018). Hydrodynamic performance of floating breakwaters in long wave regime: An experimental study, *Ocean Engineering* 152, 154–166.
- Korobenko, A., Yan, J., Gohari, S.M.I., Sarkar, S., Bazilevs, Y., (2017). FSI Simulation of two back-to-back wind turbines in atmospheric boundary layer flow, *Computers and Fluids*, 158, 167-175.
- Liang, Y., Tao, L., (2017). Interaction of vortex shedding processes on flow over a deep-draft semi-submersible, *Ocean Engineering*, 141, 427-449.
- Liu, J., (2016). A second-order changing-connectivity ALE scheme and its application to FSI with large convection of fluids and near contact of structures, *Journal of Computational Physics*, 304, 380–423.
- Liu, H., Xu, K., Zhao, Y., (2016). Numerical investigation on the penetration of gravity installed anchors by a coupled Eulerian–Lagrangian approach. *Applied Ocean Research* 60:94–108.
- Loukogeorgaki, E., Yagci, O., Kabdasli, M.S., (2014). 3D Experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules, *Coastal Engineering*, 91, 164–180.
- Maa, R., Bia, K., Hao, H., (2018). Mitigation of heave response of semi-submersible platform (SSP) using tuned heave plate inerter (THPI). *Engineering Structures* 177, 357–373.
- Martínez, E.L., Quiroga, A.G., Jardini, A.L., Filho, R.M., (2009). Computational fluid dynamics simulation of the water–sugar cane bagasse suspension in pipe with internal static mixer, *Computer Aided Chemical Engineering*. 26, 683-688.
- Ning DZ, Zhao XL, Zhao M, Hann M, Kang HG. Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater, *Applied Ocean Research*, 65:102-111. 2017.
- Reddy, J.N., (2010). Principles of Continuum Mechanics. Cambridge University Press, New York, USA.
- Ren, B., He, M., Li, Y., Dong, P., (2017). Application of smoothed particle hydrodynamics for modeling the wave-moored floating breakwater interaction, *Applied Ocean Research*, 67, 277-290.
- Sha, Y., Amdahl, J., Aalberg, A., Yu, Z., (2018). Numerical investigations of the dynamic response of a floating bridge under environmental loadings, *Ships and Offshore Structures*, 13:1, 113–126.
- Tang, H., Huang, C.C., Chen, W.M., (2011). Dynamics of dual pontoon floating structure for cage aquaculture in a two-dimensional numerical wave tank, *Journal of Fluids and Structures*, 27, 918–936.
- Yanga, Z., Xie, M., Gao, Z., Xu, T., Guo, W., Ji, X., Yuan, C., (2018). Experimental investigation on hydrodynamic effectiveness of a water ballast type floating breakwater, *Ocean Engineering*, 167, 77-94.
- Zhan, J.M., Chen, X.B., Gong, Y.J., Hu, W.Q., (2017). Numerical investigation of the interaction between an inverse T-type fixed/ floating breakwater and regular/irregular waves, *Ocean Engineering*. 137, 110–119.
- Zhao, Y.P., Bai X.D., Dong, G.H., Bi, C.W., (2016). Deformation and stress distribution of floating collar of net cage in steady current, *Ships and Offshore Structures*. doi: 10.1080/17445302.2016.1210321.

## Investigation of Composite Marine Structure under Wave Loads

### Extended abstract

*Floating structures have become prevalent because of being used in any depth in shallow water, transition zone and deep water. pontoons which are situated in bottom parts of these structures provide floating. pontoons perform service either fully submerged or semi submerged.*

*In this study, numerical analysis of semi submerged pontoons which are manufactured from different materials is performed under the effect of wave forces. While outer part is designed as concrete, inner part is designed as foam of the first structure (Model 1). On the other hand, second structure is designed from only rigid plastic material. Abaqus finite elements analysis program is used in the analyses. Bilateral fluid-structure interaction analyses are utilized between the structure and the marine environment where the structure exists. Combination of Eulerian-Lagrangian approaches (CEL) is used in modelling phase of bilateral interaction analysis.*

*To create a coupled Eulerian-Lagrangian model in Abaqus/CAE, simply instance both Eulerian and Lagrangian parts in the same assembly. Eulerian material can interact with Lagrangian elements by Eulerian-Lagrangian contact; simulations including this type of contact are usually attributed to as coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) analyses. This significant property of Abaqus/Explicit general contact allows fully coupled multi-physics such as fluid-structure interaction simulation.*

*While marine environment is modelled by Eulerian approach, structure is modelled as Lagrangian approach. Linear wave velocity profile is used while modelling the marine environment. Sensitivity analyses are performed to determine the most proper node and element numbers in the solutions. These analyses are carried out through modal behavior.*

*Proper elements which are compatible with CEL approach are used in the program. While 8-node, continuum, three dimensional, 8 node and reduced integration (C3D8R) type element is used*

*for the structure, EC3D8R type elements having the same properties are used for fluid.*

*Node and element numbers change in terms of solving the same physical problem by only Lagrangian approach instead of Eulerian-Lagrangian approach. In this situation, Element type will be C3D10M. Node and element numbers will increase in case of considering the same seed sizes in the structural model. In addition to increasing node and element numbers, fluid and structure will be modelled in different interfaces. Due to different interfaces and increase in node and element numbers will also increase the memory requirement and extend the solution times. So, performing both Eulerian-Lagrangian approaches together in similar fluid-structure interaction problems will make the solution easier.*

*Analysis of the numerical model is performed through wave water surface profiles. Time-varying water surface profiles are analytically and numerically obtained in two different points. The accordance between analytic and numerical wave profiles is both visually and numerically determined.*

*Modal behaviors, frequencies and stress distributions are determined in structural analysis. At the end of the study, node and element numbers are obtained in case of using different fluid-structure interaction technique. Effect of these values on the solution is discussed in terms of time and memory requirement.*

**Keywords:** *Fluid-structure interaction, numerical analysis; Eulerian-Lagrangian approaches; floating structures*



# Elektroosmoz ve Isıl İşlemler Yöntemleri İle Zeminlerin İyileştirilmesi ve Stabilizasyonu

**Mehmet Hayrullah AKYILDIZ\***

Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır  
[hayrullah.akyildiz@dicle.edu.tr](mailto:hayrullah.akyildiz@dicle.edu.tr)

Geliş: 10.05.2019, Revizyon: 08.08.2019, Kabul Tarihi: 05.09.2019

## Öz

*Elektroosmoz yöntemi, ince taneli yumuşak kil ve silt gibi zeminlerde dayanım artımı ve deformasyon özelliklerinin ıslahı üzerinde yaklaşık 50 yıldır başarılı bir şekilde uygulanan yöntemlerden biridir. Bu yöntem, anot ve katot olarak belirlenen noktalar arasına doğru akım verilerek ıslahı istenen problemleri bir zemin ortamında, boşluk suyunun anottan (+) katoda (-) doğru hareketinin sağlanması şeklinde uygulanır. Bu uygulamada katotta toplanmaya başlayan su, dışarı pompalanır ve anota gelebilecek suyun önü kesilirse bu durum boşluk suyunun belirli bir zamanda tahliyesiyle bir konsolidasyon mekanizması kurulmuş olur. Uygulamanın, doygun silt ve siltli killerin normal konsolide olması ve boşluk suyu eriyik oranının düşük olması halinde verimli olabileceğinin de belirtilmesinde yarar vardır. Bu uygulama sırasında anottan katoda doğru bir su akımı oluşacağından anot tarafına stabilizasyon artırıcı ve istenilen özelliklere sahip sıvılar bırakılırsa zeminde ek bir kimyasal stabilizasyon da söz konusu olacaktır.*

*Isıl işlemlerden dondurma yöntemi ilk defa 100 yıl önce kullanılmaya başlanmıştır. Metotta, zemin içindeki su donuncaya kadar soğutulur böylece daha büyük dayanıma sahip geçirimsiz bir zemin elde edilir. Donmuş zeminlerin kayma mukavemeti parametreleri donmamış zeminlere oranla daha yüksektir. Kısa süreli zemin iyileştirmesi gereken durumlarda bu yöntem kullanılabilir. Dolayısıyla dondurma yöntemi, şevlerin stabilitesinin kısa süreli sağlanmasında, temel çukurunun kuru tutulması gereken durumlarda vb. kullanışlı bir yöntemdir.*

*Isıl işlemlerden ısıtarak iyileştirme yöntemi ise zeminlerin kayma direnci parametreleri buldukları kıvam ile yakından ilgilidir. Kıvamlarının likit limite yakın olmaları halinde kayma dirençleri son derece azalmaktadır. Ortamdaki suyun azaltılması zeminin yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile sağlanabilir. Killer 400-600 °C'ye kadar ısıtıldığında silikatlaşmakta ve 900 °C'de klinkere dönüşerek faz değiştirir. Bu durumda killer bünyelerine rutubet alamayacak kadar değişikliğe uğramaktadırlar.*

**Anahtar kelimeler:** Elektroosmoz, İnşaat Mühendisliği Uygulamaları, Isıl işlemler, Dondurma Yöntemi, Isıtarak İyileştirme

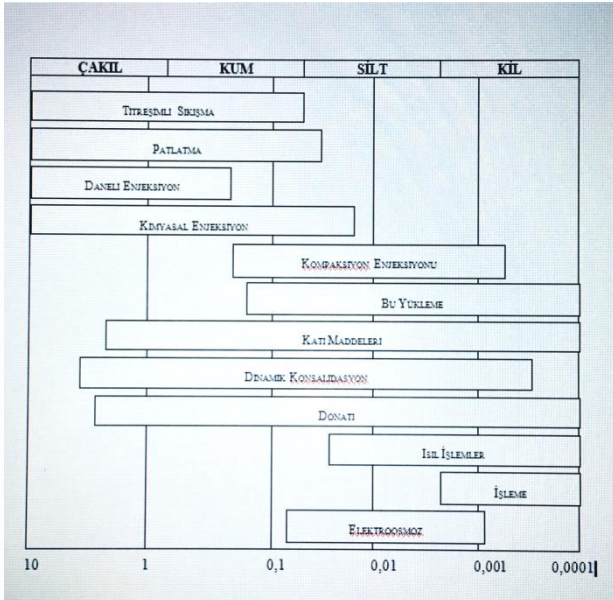
\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

### Elektroosmoz Yöntemi

İlk kez 1808 Yılında Rus bilim insanı Ruess tarafından denenmiş olan bu yöntem daha sonra Leo Casagrande(1967) tarafından geliştirilmiş ve Bjerrum ve ark.(1967), Hansbo(1970), Chappel ve Burton(1975) konu ile ilgili araştırmalar yapmış ve oldukça başarılı sonuçlar almışlardır. Çizelge 1'de elektroosmoz yöntemini diğer ıslah yöntemleri ile mukayesesi ve uygulanabilirlik sınırları gösterilmiştir.

**Çizelge 1** Islah yöntemlerinin uygulanabilirlik sınırlarının karşılaştırılması [G.Üniv. Müh. Mim. Fak. Murat Mollamutoğlu Ders Notları]



Yukarıda sözü edilen zemin kayma ve basınç dayanımlarında artış, düşey boyutlarında bir azalma(oturma) şeklinde kendini gösteren elektroosmoz konsolidasyonuna ek olarak anot ve katot arasında uygulanan doğru elektrik akımı;

1. İyon değişimi
2. Elektrotlar yakınında zemin taneciklerinin elektrokimyasal ayrışması
3. Zemin taneciklerinin kristal yapılarında bazı değişimlere de neden olabilmektedir.

Bunlara kısaca elektroosmoz stabilizasyonu denir.

İslahı istenen zeminlerde uygulanan doğru akım sırasında, zemin taneciklerinin etrafını kuşatan

yaygın çift katman üzerinde bulunan katyonlar, elektron kazanmak üzere katoda doğru hareket eder ve katot ta elektriksel yükten arınmış olur.

Aynı anda sistemde serbest kalan anyonlar da anota doğru hareket ederler. Katyonlar bu hareketlerinde beraberlerinde su moleküllerinide taşırlar. Bu taşıma işlemi, su moleküllerinin dipol özelliğinden dolayı gerçekleşebilmektedir. Bu arada anyonlarda hareketleri sırasında az miktarda suyu yanında götürmekle birlikte, sonuç olarak katotlara doğru net bir su akışı olur.

## ISIL İŞLEMLER

### 1-Dondurma

Dondurulmuş zemin gövdesinin korunması için sürekli soğutmaya (enerji harcamaya) gerek vardır. Dondurma yöntemi hemen hemen tüm zemin türleri için kullanılabilir. Kendini kısa süreli de olsa tutamayan zeminlerde, açılacak temel çukurlarında veya tünel inşaatlarında boşluk suyu dondurularak kazı kesitinde geçici olarak stabilite sağlanır. Boşluk suyunun dondurulması ile oluşan buz mercikleri zeminin kayma mukavemetini ve rijitliğini artırır. Dondurma işlemi, su muhtevası %50'ye kadar olan hemen hemen her cins zeminde uygulanabilmektedir. Yer altı suyunun hareketli olması durumunda bu teknik uygulanmaz.

Dondurma teknolojisi, zemine sokulan dondurma boruları içinden soğuk taşıyıcı akışkan dolaştırılarak zemin suyunun dondurulması için iç içe geçen iki borudan gönderilerek dış borudan geri alınır. İç boru ile dış boru arasındaki dolaşım sonucu, dondurma borusu etrafındaki zemin dondurulur. Soğutma maddesi genellikle amonyak(NH<sub>3</sub>) ve karbondioksit(CO<sub>2</sub>), soğuk taşıyıcı akışkan olarak ta genellikle magnezyum(Mg) veya kalsiyumklorür (CaCl<sub>2</sub>) kullanılır.

Zemin destek ve kazı işlerinin yapılacağı yerlerde sondaj yöntemi ile delinir ve borular indirilerek dondurma tekniğinin tipine göre sistem kurulur. Planlı bir şekilde açılan delikler etrafında tekniğe göre belirli bir çapta donmuş zemin oluşur. Likit nitrojen veya karbondioksit kullanılan sistemler birkaç saatte etkili olabildiğinden acil durumlarda tercih edilmektedir. Klasik soğutucu devrelerde günlerce veya haftalarca beklemek gerekir.



Dondurma tekniğinde iki ana problem vardır, Önce ortamın ısı özelliklerinin ölçümü gerekir. Daha sonra dondurulmuş ortamın alacağı gerilmeler altında kazı ve yapım sırasında dengede kalıp kalmayacağı yeni gerilme-şekil değiştirme bağıntıları da kestirilmelidir.

İdeal uygulama yumuşak zemin koşullarında yer altı su seviyesinin altında ve 7-8 m. derinliklerde yapılır.

Başarılı bir dondurma işlemiyle kazının güvenlik altına alınması kısa süre için yeterli sayılabilir. Yapılan araştırmalarda zemin-su-buz karışımının geçici yüklere direncinin büyük olduğu ancak uzun vadede sönümlülük nedeniyle çok daha düşük gerilmeler alabileceğini ortaya koymuştur.

## 2-Isıtarak İyileştirme

Zeminlerin ısı ile iyileştirilmesi özellikle lös(kil,silt) zeminlerde uygulanmaktadır. İyileştirme bölgesine açılan sondaj deliğinden basınçlı hava ve yakıt ağızından kaçmayacak şekilde basılır. Böylece delik içerisinde sıcaklığın 300-1000 °C'ye ulaştığı bir bölge oluşur. Deliğin çevresinde artan ısı nedeniyle bünyedeki su atılmakta ve zemin iyileşmektedir. Silt ve killer ortamın sıcaklığının olağan limitler üzerine çıkarılmasıyla kayma direnci parametreleri artırılarak zemin iyileştirilmektedir.

Isı uygulaması ile iyileştirilmekte olan doğu bloğu ülkelerinde sıklıkla kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık; elektrotlar kullanılarak elektrik akımı ile ya da benzin alevi yardımıyla sağlanır. Uygulamaya ısı kayıplarının önlenmesi için kuyu ağızı kapatılır.

Uygulama; kompresörden 1,5 atm basınçla gelen hava petrol tankına basılır. Yakıt filtreden süzülüp pompa ve giriş borusu ile kuyu içine verilir. Uygulama kuyuların yerleri, aralıkları ve derinliklerinin belirlenmesi arazi deneyleri ile yapılmalıdır.

## Materyal ve Yöntem

Elektroosmoz nedeniyle ortaya çıkan ve zeminden alınması gereken su miktarı, su moleküllerini harekete zorlar ve elektriksel kuvvetler ile harekete karşı yönde oluşan ve doğal su moleküllerinin, ince zemin taneciklerinin arasından geçerken ortaya çıkan

sürtünme direncine eşitlenmesi sonucu belirlenebilir. Buna göre, iki elektrot arasında oluşan akım, voltaj eğimi (gradiyeni) yönünde su akış hızına sahip olabilir.

$$Ve = -k \frac{\partial E}{\partial x} \quad (1)$$

Burada;  $Ve$  : Akış hızı(m/s)

$ke$  : Elektroosmotik geçirgenlik katsayısı (m/s volt/m)

$E$  : İki elektrot arasında gerilim (volt)

$X$  : Katottan itibaren mesafe (m)

$\frac{\partial E}{\partial x}$  : Elektriksel potansiyel eğimi (volt/m)

Hız denklemi hesaplandıktan sonra iki elektrot arasında akan su miktarı;

$$q = ke . ie . A \quad (2)$$

$$q = Ve . A = k \frac{\partial E}{\partial x} . A \quad (2')$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

$q$  : Akımın debisi (m<sup>3</sup>/sn)

$\frac{\partial E}{\partial x}$  : Elektriksel potansiyel eğimi (volt/m)

$A$  : Akımın oluştuğu kesit alanı (m<sup>2</sup>)

Bu eşitlik, laminer hidrolik akımlardaki Darcy ifadesine benzetebilir. İnce taneli zeminlerin bünyesinde bulunan kapiler akım iplikçiklerinin toplamı dikkate alınarak, elektroosmoz yönteminde geçirgen katottan boşaltılacak su miktarı bulunabilmektedir. Bu yaklaşımla, elektroosmotik geçirgenlik katsayısı  $k_e$ , hidrolik geçirgenlik katsayısı  $k_h$ 'a tekabül ettiği düşünülebilir.

Yukarıda belirlenendebi, aynı zamanda zemine verilen akımın ve buna bağlı geçirgenlik katsayısı  $k_i$ 'nin fonksiyonu olarak da ifade edilebilir.

$$q = k_i . I \quad (3)$$

Burada:

$q$  : Akımın debisi (m<sup>3</sup>/sn)

$k_i$  : Elektrik akımına bağlı hidrolik geçirgenlik katsayısı (m<sup>3</sup>/sn/amp)

$I$  : Zemindeki elektrotlara verilen akımın şiddeti (amp)

Elektrosmotik geçirgenlik katsayısı  $k_e$ , elektrik akımına bağlı hidrolik geçirgenlik katsayısı  $k_i$ 'nin bir fonksiyonu olarak da ifade edilebilir.

$$k_i = \frac{k_e}{\delta} \quad (4)$$

Burada;

$\delta$  : Özgül elektriksel iletkenliktir.(mho/m)

$\delta$ 'nın değerleri, 0.02(düşük tuz oranlı ortam) ile 0.3(tuzlu zemin suyu) arasında değişmektedir.

$k_i$  değerleri ise (çizelge 2)'de verilmiştir.

**Çizelge 2** Elektrik akımına bağlı hidrolik geçirgenlik katsayısı değerleri (su kapsamı %50-100 arasında)[Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Ders Notları]

ZEMİN TİPİ	BOSLUK SUYU TUZ KONSANTRASYONU (N)	$K_i$ M <sup>3</sup> /SN/SMP
SİTLİ KNOLİNİT	KİL	$10^{-3}$
SİTLİ KLOMİNİT	KİL	$10^{-2}$
İLLİT KİL		$10^{-1}$
İLLİT KİL		$10^{-2}$

Uygulamada kullanılan doğru akım jeneratörünün gücü;

$$P = q \frac{\Delta E}{k_i} 10^{-3} \quad (kwh) \quad (5)$$

Burada;

$\Delta E$  : Elektrotlar arasındaki voltaj düşümdür. Elektrosmoz yönteminin, zemin kayma direnci ve sertlik özelliğinin ıslahında kullanılmamasındaki amaç, su muhtevasının azaltılmasıdır. Bu da ancak geçirimsiz anot ve pompaj yoluyla da olsa drenajı sağlanmış olan (geçirimli) katot uygulaması ile mümkün olabilmektedir. Anottan, katoda doğru akmakta olan su anot çevresindeki zeminin boşluklarında, negatif boşluk suyu basıncı oluşturur. Anot çevresindeki zemin taneleri arasında bulunan suyun basıncı, zamanla akış nedeniyle negatif değerler almaya başlayarak, ortaya çıkan etkin gerilme artışı (5) ile belirtilen bir konsolidasyon oturmasına neden olacaktır.

$$\delta c = \sum_v \Delta \sigma_{v_i} \cdot h_i \quad (6)$$

Burada ortaya çıkan hidrolik eğim, anot yönüne doğrudur ve osmotik akış, hidrolik akışa zıt doğrultudadır. Akış sırasında boşluk suyu basıncının negatif değeri arttıkça, anottan katoda doğru olan su akışı azalır ve bir denge noktasında durur.

Daha kaba taneli topraklarda etkin gerilmelerdeki artış oldukça az olmasına karşılık, ince taneli topraklarda ortaya çıkan etkin gerilme nispeten daha fazladır. Fakat bu şekilde büyük gerilme değerleri elde edilebilmesi için geçen süre oldukça uzundur. Bu yöntemle elde edilebilecek konsolidasyon zeminin sıkışabilirliğine bağlıdır ve bu nedenle söz konusu yöntem aşırı konsolide killerde pratik olarak uygulanamaz. Bu durumda, belirli bir sürede meydana gelecek negatif boşluk suyu basıncı optimum konsolidasyon koşullarını belirleyebilecek bir faktör olarak karşımıza çıkacaktır.

Yukarıdaki koşulları sağlayan zemin ortamı; normal konsolide siltli killi zeminlerdir. Bütün bu koşulların yanında boşluk suyunun elektriksel geçirgenliğide yöntemin başarılı uygulanması için önemli bir faktördür. Elektriksel geçirgenlik çok yüksekse eğer (ortamın tuz konsantrasyonu yüksekse) elektrotlar arasında uygulanan voltaj düşüşü çok ani olmakta veya diğer bir ifadeyle elektriksel eğimin sabit tutulması için çok fazla elektrik akımı gerekebilecektir. Bu da oldukça yüklü bir elektrik masrafına sebep olacaktır.

**Çizelge 3** Elektrosmotik geçirgenlik katsayısı  $k_e$  ile hidrolik geçirgenlik katsayısı  $k_h$  ın karşılaştırılması [Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Ders Notları]

ZEMİN CİNSİ	SU KAPAN.. %	$\frac{k_e \times 10^{-5}}{sn} \cdot v$	$\frac{k_h}{cm/sn}$	$\frac{k_a}{k_h} n/v$
LONDRA KİLİ	52,3	5,8	$10^{-8}$	6,0
KNOLİN	67,7	5,7	10	0,6
KİLLİ SİLT	31,7	5,0	10	0,05
KAYA ÜNU	27,2	4,5	10	0,045
<i>Na – Nontmorillonit</i>	170,0	2,0	10	20,0
<i>Na – Nontmorillonit</i>	1000,0	12,0	10	12,0
MİKA TOZU	49,7	6,9	10	0,007
İNCE KUM	26,0	4,1	10	0,0004
KUVAZ TOZU	23,5	4,3	10	0,0004

### Konsolidasyon zamanının belirlenmesi

Etkin gerilmenin ortaya çıkması için gerekli zamanın belirlenmesi amacıyla hidrolik ve elektroosmotik akışlar bileşke hızı teşkil etmek üzere süperpoze edilerek;

$$-v = \frac{kh}{\alpha w} \frac{\partial u}{\partial x} + ke \frac{\partial E}{\partial x} \quad (7)$$

(Şekil 2)de boşluk basıncının değişimi görülmektedir. Analizler sonucunda, boşluk suyu basıncını değişimi, hidrolik geçirgenlik  $k_h$  ve zeminin kompresibilitesi (sıkıştırılabilirliği) ile hesaplanabilmektedir.

$$T_v = \frac{c_v t}{L^2} = \frac{k_h}{m_w \alpha_w} \frac{t}{L^2} \quad (8)$$

Esirg(1968)in analizlerine göre, geçirimsiz anotta maksimum negatif boşluk suyu basıncı;

$$u_{max} = -\frac{k_e}{k_h} E_o \alpha_w \quad (9)$$

Bu durumda, katodun geçirimli(sıfır boşluk basıncına sahip) olması gereklidir.

Buna göre etkin gerilmelerdeki değişimler, geçirgenlik kat sayılarının oranıyla belirlenebilmektedir.

Boşluk suyu basıncının bulunması için genel çözüm;

$$u = \left(\frac{k_e}{k_h}\right) \alpha_w E + \frac{2k_e \alpha_w E_o}{k_h \pi^2} f(T_v) \quad (10)$$

Burada;

$$f(T_v) = \sum_{n=0}^{n.o} \frac{(-1)^n}{(n+\frac{1}{2})^2} \sin \frac{(n+\frac{1}{2})\pi x}{L} e^{-(n+\frac{1}{2})^2 \pi^2 T_v} \quad (11)$$

Burada E, (Şekil 1) katottan X uzaklığında bulunan bir elektrik gerilimi (voltaj) değeri,  $E_o$  ise anot ve katot arasında uygulanan voltajdır. Ortalama konsolidasyon derecesi, anot ve katot arasındaki L uzaklığı üzerinde ortalama negatif boşluk suyu basıncıdır.

$$U_c = 1 - \frac{4}{\pi^3} \sum_{n.o} \frac{(-1)^n}{(n+\frac{1}{2})^3} e^{-(n+\frac{1}{2})^2 \pi^2 T_v} \quad (12)$$

Bu analiz, anot ve katot levhalarının birbirinden L uzaklıkta bulunmaları hali için yapılmıştır. Akım verilmesinden belirli bir süre sonra, etkin gerilmedeki değişim anottan geçirgen (sıfır boşluk basıncına sahip) katoda olan mesafenin artışı ile azalmaktadır.

(11) nolu eşitlikte de belirtildiği gibi, negatif boşluk basıncının gelişim hızı hidrolik geçirgenlik  $k_h$  ve düşey kompresibilite katsayısı  $m_v$ 'nin bir fonksiyonudur ve elektroosmotik geçirgenlik katsayısı  $k_e$ 'ye bağlı değildir.

### BULGULAR

Elektroosmotik konsolidasyon yönteminin arazide uygulanması;

2-4 m. aralıklarla çubuk ve boru elektrotların çakılmasıyla gerçekleşir. Değişik şekillerde düzenlenmiş elektrot yerleştirme tipleri görülmektedir. Burada elektrik akımının farklı elektrot düzenlemeleri için değişik analizler yapılmış ve belirtilen hegzagonal dizilişin en ekonomik düzenleme olduğu belirtilmiştir.

#### Çizelge 4 Farklı elektrot diziliş modelleri

	DÜZ KARE DİZİLİŞ	KARIŞIK KARE DİZİLİŞ	HEGZAGONAL DİZİLİŞ
ALAN / TEMEL ÜNİTE	2s <sup>2</sup>	2 <sup>2</sup> δ	2.6 δ <sup>2</sup>
ANOT/TEMEL ÜNİTE	1	1	2
KATOT/ BİRİM ALAN	0,5 δ <sup>2</sup>	0,5 δ <sup>2</sup>	0,38 δ <sup>2</sup>
ANOT/ BİRİM ALAN	0,5 δ <sup>2</sup>	0,5 δ <sup>2</sup>	0,38 δ <sup>2</sup>
ORTALAMA VOLTAJ, V	0,5 v	0,5 v	0,74 v
GÜÇ/ BİRİM ALAN (AYNI V İÇİN)	0,53 $\frac{V^2}{p} / S^2$	0,60 $\frac{V^2}{p} / S^2$	0,60 $\frac{V^2}{p} / S^2$
GÜÇ/ BİRİM ALAN (AYNI V İÇİN)	2,10 $\frac{V^2}{p} / S^2$	2,40 $\frac{V^2}{p} / S^2$	1,10 $\frac{V^2}{p} / S^2$

Buna göre; hegzagonal dizilişte

- Maksimum enerji tasarrufu sağlanır
- Yüksek değerlerde ortalama voltaj elde edilir(ortalama voltaj ne kadar yüksekse, o derece etkin bir konsolidasyon sağlanır).
- Anot/katot oranı optimumdur.

Bunlara ilave olarak, elektro osmotik konsolidasyon sırasında ortaya çıkan zemin özelliklerindeki bazı değişimler(ort:ke/kh oran

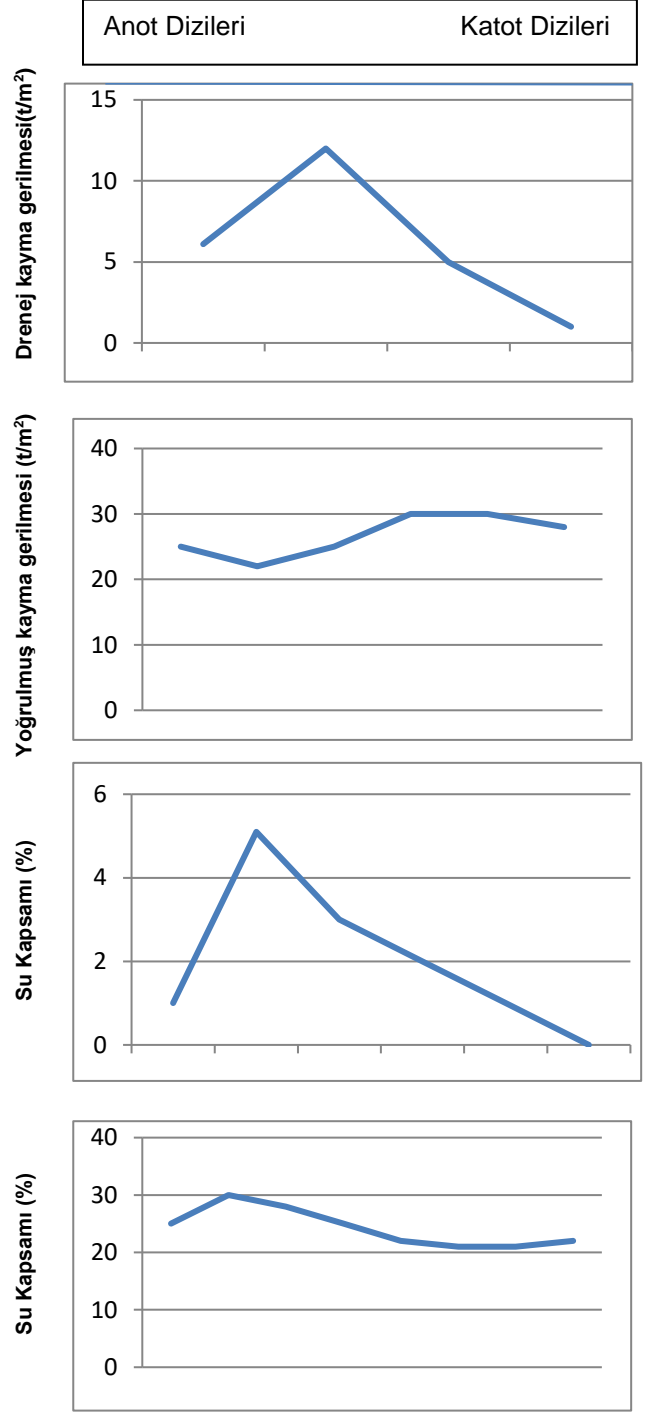
gibi) teorik uygulamadan sapmalara yol açabilmektedir(Mitchel ve Man, 1977). Bununla birlikte (Çizelge 5) değerleri konsolidasyon zamanının yaklaşık olarak belirlenmesinde kullanılabilir.

**Çizelge 5** Paralel plaka elektrotlarla zaman faktörü  $T_v$  ve farklı konsolidasyon yüzdeleri  $U$  değerleri arasındaki bağıntı [Doğu, O., 2005.]

KONSOLIDASYON DERECESESİ	ZAMAN FAKTÖRÜ $T_v$	
	LİNEER DEĞİŞİM	BAŞLANGIÇTA SONSUZ EĞİM (i)
0	0	0
10	0,05	0,001
20	0,10	0,007
30	0,16	0,017
40	0,22	0,020
50	0,29	0,05
60	0,38	0,07
70	0,50	0,10
80	0,66	0,14
90	0,20	0,20

Katotlara bağımlı anotların sayısındaki artış iki açıdan elverişlidir. Hassas killer üzerinde yapılmış olan bir elektroosmotik konsolidasyonun olumlu etkileri görülebilmektedir(Bjerrum ve ark. 1967)

Zemin özelliklerindeki ıslahla ilgili değişimlerin anottan katoda doğru uzaklaştıkça azaldığı kolaylıkla izlenebilir



**Şekil 1** Hasas killer üzerinde yapılmış bir elektro osmotik konsolidasyon örneği sonuçları[Doğu, O., 2005.]

## Sonuçlar ve Tartışma

Günümüze kadar arazide yapılan uygulamalar aşağıdaki koşullarda elektroosmotik konsolidasyonun etkin ve ekonomik bir ıslah yöntemi olabileceğini göstermektedir.

- 1.Suya doygun sitler veya siltli zeminler,
- 2.Normal konsolide zeminler,
- 3.Düşük boşluk suyu elektrolit konsantrasyonlarına sahip zeminler

## Kaynaklar

Bowles, E. J., 1988, "Foundation Analysis and Design", McGrawhill International Editions, Civil Engineering Series, 4th Edition, p: 288-300, Singapore

Chao, K. H., and Chin, K. Y., 1963, "The Study of Improving Bearing Capacity of Tapei Silt by Using Quickline Piles", Proceedings of the 2nd Asian Regional Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, p: 387-389, Tokyo.

Doğu, O., 2005. Jetgruting Tekniği ile Zemin Islahı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enst., İnşaat Müh. Anabilim dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 128s.

G.Üniv. Müh. Mim. Fak. Murat Mollamutoğlu Ders Notları

G.Üniv. Müh. Mim. Fak. Yrd. Doç. Dr. Fahri Özbayoğlu Ders Notları

Koerner, R., M., 1997, "Designing with Geosynthetics", 4th Edition, Prentice Hall.

Leonards, G.A., 1962. Foundation Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, 1136 pp.

Rixner, J. J., Kraemer, S. R. And Smith, A. D., 1986. Prefabricated Vertical Drains: vol. 1 Engineering Guidelines, FHWA/RD-86/168, FHWA, Springfield, Virginia.

Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Ders Notları

Elektrotlardaki gaz oluşumu, kuruma, çatlama söz konusu yöntemin etkinliğini azaltmakta ve oluşacak konsolidasyon basıncının değerini sınırlandırmaktadır. Elektrotlar arasında uygulanan voltaja ve zaman zaman ortaya çıkan voltaj değişimlerine bağlı olarak üniform olmayan ve yer yer değişim gösteren ıslah sonuçları ortaya çıkabilmektedir. Bu gibi durumlarda anot ve katodun yeri değiştirilerek daha üniform bir konsolidasyon temin edilmesi söz konusu olabilir.

Terzaghi, K. 1943. Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY.

## **Improvement and Stabilization of Soils by Electroosmosis and Heat Treatment Methods**

**Keywords:** *Electroosmosis, Civil Engineering Applications, Heat Treatments, Freezing Method, Heating Improvement*

### **Extended abstract**

*The electroosmosis method is one of the methods that has been successfully applied on the improvement of strength and deformation properties on fine grained soft clay and silt soils. This method is applied in the form of a correct ground flow between the points determined as anode and cathode and provides correct movement of the gap water from the anode (+) to the cathode (-) in a problematic ground environment. In this application, the water that starts to collect in the cathode is pumped out, and if water is cut off to the anode, a consolidation mechanism is established by evacuating the gap water at a certain time. It should be noted that the application may be efficient if the saturated silt and silty clays are normally consolidated and the pore water melt rate is low. During this application, an anodic water flow from the anode to the anode side stabilization enhancer and the desired properties of the liquid is left an additional chemical stabilization of the floor will be in question.*

*The freezing method from heat treatment was first used 100 years ago. In the method, water in the ground is cooled to freeze so that an impermeable floor with greater strength is obtained. The shear strength parameters of the frozen floors are higher than the untreated soils. This method can be used when short-term ground improvement is required. Therefore, the freezing method, the stability of the slope in the short-term provision, where the basic pit should be kept dry and so on. is a useful method.*

*If the heat treatment is improved by heating, the sliding resistance parameters of the floors are closely related to the consistency. If the consistency is close to the liquid limit, the shear resistance is very low. Reducing water in the environment can be achieved by heating the floor at high temperature. Clays are silicified when heated up to 400-600 °C and phase change by turning to clinker at 900 °C. In this case, clays are subject to changes so that they do not get moisture.*



# Yeniden işlevlendirilen Hasan Paşa Hanı'nın kullanım sonrası değerlendirmesi

**Mehmet CEBE\***

Dicle Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu Diyarbakır/Türkiye  
mehmetcebe1@gmail.com ORCID: 0000-0003-0916-5955 Tel: (412) 241 10 00 (7751)

**Nurtekin ÖZEN**

Fırat Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Elazığ/Türkiye  
nozen@gmail.com ORCID: 0000-0002-2509-1864

**Can Tuncay AKIN**

Dicle Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, Diyarbakır  
ctakin@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0001-9658-7712

Geliş: 14.06.2019 , Revizyon: 28.06.2019 , Kabul Tarihi: 20.07.2019

## Öz

Son yüzyılda dünya genelinde yaşanan değişimin etkileri ülkemizde de ciddi oranda yaşanmıştır. Her alanda görülen bu değişimden en fazla etkilenen alanlardan biri de mimari olmuştur. Geleneksel yapılar yaşanmışlıkların, tarihin, geleneğin, tekniğin ve kültürün sonraki nesillere ulaştırıldığı tarihi belge niteliği taşımaktadır. Bu nedenle geleneksel yapılar, özgün kimlikleri ile korunmaları durumunda ancak söz konusu anlamlarını sonraki nesillere taşımaya devam edebileceklerdir. Geleneksel yapıların özgün kimlikleri ile korunmalarına katkı sunmayı amaçlanmakta olan bu çalışma kapsamında tarihi yapıların yaşatılarak korunması sürecinde yaşanan aksaklıkların tespit edilmesi hedeflenmektedir. Yaşanan değişimden mimari alanda en fazla etkilenen yapı grubunu yeni ihtiyaçlar ve ekonomik kaygıların etkisi ile geleneksel han yapıları oluşturmaktadır. Bu yapılardaki sağlıksız ve kimliksiz müdahaleler ve yeni işlevlendirmeler ciddi sorunları beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda geleneksel han yapılarının yeni işlevlerinin, yapı ve kullanıcılar üzerindeki etkilerinin bilimsel yöntemlerle araştırılması, olumsuz yönlerinin tespit edilerek çözüm önerilerinin sunulması bu yapıların korunması sürecinde en önemli faktörlerden biri olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma kapsamında Diyarbakır kentinde bulunan şehir içi hanlarından yeniden işlevlendirilmiş olan Hasan Paşa Hanının özgün niteliklerini korumak amacıyla, bu yapının yeni işlevi ve kullanım alanlarına ait gözlemsel saptamalar yapılarak görsel analizler oluşturulmuştur. Yapılan tespitler ışığında yapının özgün kimliğini bozan müdahaleler belirlendikten sonra kullanıcı memnuniyet seviyesinin belirlenmesine yönelik olarak anket çalışmaları yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hasan Paşa Hanı, Tasarım, Yeniden İşlevlendirme, Gözlemsel Analiz, Yaşatarak Koruma

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI: 10.24012/dumf.578019

## Giriş

Sadece bir bireyin, toplumun veya ülkenin değil bütün bir insanlığın ortak kültürel mirası olan geleneksel yapılar, taşıdıkları anlam ile sonraki nesillere devredilmelidir. Bu yapılar üretildikleri kültürlerden etkilendikleri kadar sonraki kültürleri de etkileyen ve kent kimliğinin oluşmasına katkı sağlayan kentlerin önemli bileşenleridir. Bu bakımdan geleneksel yapılar, önceki kültürlerin günümüze taşınmasına katkı sunmasının yanında günümüz ve gelecekteki topluma ait yapı stoklarının biçimlendirilmesinde de önemli bir rol üstlenmektedir.

Dünya genelinde sanayi devriminden sonra başlayan ve uzun yüzyıl olarak adlandırılan (Özkan Altınöz, 2014, s. 838) 19.yüzyılda kırsal kesimden büyük şehirlere ve sanayi bölgelerine hızlı bir göç akımı başlamıştır. Özellikle 20.yüzyılda yaşanan savaşlar ve toplumsal çatışmalardan kaynaklanan nedenler göç sürecini daha da hızlandırmıştır. Kırsal kesimden kent merkezlerine yaşanan göçler sonucunda barınma ihtiyacının karşılanmasına yönelik olarak ciddi bir yapılaşma süreci başlamıştır. Böylece kent merkezlerindeki demografik yapılarda önemli değişiklikler yaşanmış, yerleşik halk genellikle yeni üretilen yapıları tercih ederek kullandıkları yapıları yeni yerleşimcilere bırakmıştır. Daha önce edindikleri yaşam tecrübelerini bu bölgelere taşıyan yeni kullanıcılar, taşıdıkları geleneksel yapılara belirli oranlarda müdahalelerde bulunmuştur. Teknolojik gelişmelerin geleneksel mekânlara uyarlanması öncelikli müdahaleler arasında yer almıştır. Dünya genelinde tarihi mirasın korunması ile ilgili artan bilinç, özellikle tarihi kent merkezlerinde bulunan geleneksel yapıların restore edilerek tekrar kullanılmasına yol açmıştır. Ancak bazı hassas müdahalelerin yapılamadığı örneklerde geleneksel yapılara zarar veren uygulamalarla da karşılaşmıştır. Bu hatalı müdahaleler, geleneksel yapılarda ciddi performans kayıplarına, özgün kimlik kayıplarına ve ayrıcalıklı özelliklerin yitirilmesine neden olmuştur.

Geleneksel yapıların onarılan ve yeniden işlevlendirilen örnekleri incelendiğinde toplumun değişen kültürel yapısı ve ekonomik beklentilerinden dolayı, koruma bilincinden çok ticari kaygıların ön plana çıktığı gözlenmektedir (Cebe,2017). Geleneksel yapıların korunmasında başarı seviyesi; ulusal ve uluslararası yasal sınırlar çerçevesinde özgün kimliğin korunmasına, çevrenin koruma ölçütlerine uyumuna ve toplumun genel beklentilerinin karşılanmasına bağlıdır. Değişen toplumsal ve bireysel beklentiler nedeniyle geleneksel yapılar, kullanıcıların ihtiyaçlarına uyum noktasında yetersiz kalmaktadır. Kullanım sonrası değerlendirme konusunda yapılan çalışmalar tam da bu noktada tarihi binaların kullanıcı ihtiyaçlarına uyumlu bir hale getirilmesi için uyumsuzlukların belirlenmesi ve önerilerin geliştirilmesine fırsat tanımaktadır. Bu çalışmada da Diyarbakır'ın Geleneksel Hasan Paşa Hanı görsel analizler ve kullanıcı memnuniyet seviyelerinin belirlenmesinden oluşan kullanım sonrası değerlendirmesi yapılmıştır.

## Amaç

Ülkemizde son yıllarda toplumda yaşanan ekonomik, sosyal ve kültürel değişim sonucunda kent merkezlerinde bulunan geleneksel yapılar özellikle de han yapıları restorasyon sonrası yüklenen yeni işlevleri ile ticari odaklar haline gelmişlerdir. Geleneksel kent merkezlerinde yaşanan bu hızlı dönüşüm esnasında, gerek onarımlar ve gerekse de yeniden işlevlendirmelerde projenin başarısı için yeteri kadar analiz yapılmadığı, daha çok ekonomik kaygıların ön plana çıktığı gözlemlenmektedir (Benli, 2007).

Küresel ölçekte çok kıymetli ve değerli olan geleneksel yapılar, korunması gereken kültürel mirasın ayrıcalıklı yapılarıdır (Akın, Bekleyen, & Yıldırım, 2016; Dalkılıç & Bekleyen, 2010; Dalkılıç, 2008,). Geleneksel yapılar genellikle günümüzde onarım sonrası kendi kaderine ve kullanıcıların sınırsız istek ve taleplerine terk edilmektedir. Özellikle reklam uğruna yapılan uygulamalar, konfor seviyesi bakımından kullanıcıların beklentileri ile teknolojik



gereksinimlerinin baskısı altında yapılan onarım ve yeniden işlevlendirme sonrası müdahaleler bu yapıların özgün kimliklerini bozmakta ve yapısal olarak zarar görmelerine neden olmaktadır.

Bir yapının fiziki şartları ne kadar iyi olursa olsun, yapıya doğru bir fonksiyon yüklenmediği sürece başarıdan söz etmek mümkün değildir. Tasarımcı yapay çevreyi, yaşamın sürekliliği ve gereksinimlerini konforlu bir biçimde sağlayacak şekilde tasarlamak zorundadır (Akin, 2001). Yapının fiziki tasarımı kadar işlevsel tasarımı da kullanıcı memnuniyet seviyesini yükselten etkenlerin başında gelmektedir. Yapı tüm kullanıcı gruplarının beklentilerini en üst düzeyde karşılayabilmelidir (Talu, 1999). Aynı zamanda yasal beklentileri, özellikle çevresel faktörler bakımından maksimum oranda karşılayabilmelidir. Yapıların kullanıcılardan bağımsız olarak tasarlanması yerine, kullanıcıların değerlendirmelerinin de alınması oldukça önemlidir. Bu nedenle olası aksaklıkların tasarım aşamasında giderilebilmesi için kullanıcıların bu aşamada sürece dahil edilmesi gerekmektedir (Dinç, 2002; Bekleyen & Yılmaz-Ay, 2016; Bekleyen & Korkmaz, 2012; Sanoff, 1992).

Bu çalışma ile geleneksel yapıların yeniden kullanılması sürecinde mevcut işlevlerinin ciddi bir şekilde irdelenmeden restorasyon<sup>1</sup> uygulamalarının yapılması ve sonrasında verilen yeni işlevlerin uygunsuzluğu nedeni ile bu işlevler ve müdahalelerin gözlemsel analizler ve KSD (Kullanım Sonrası Değerlendirme) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Temel amaç, geleneksel yapılar özelinde-yapılan onarım ve yeniden işlevlendirme çalışmalarının başarı oranının yükseltilmesini sağlayacak çözümleri bulmak hedeflenmektedir.

## Yöntem

Bu çalışmada örneklem olarak seçilen Hasan Paşa Hanı'nın onarılarak yeniden

işlevlendirilmesi sonrasında maruz kaldığı müdahaleler görsel olarak tespit edilmiş, hazırlanan bir anket formu ile kullanıcıların bu yapı hakkındaki memnuniyet seviyeleri belirlenmiştir.

Bu yapı hakkındaki verilerin toplanmasında öncelikle literatür taraması ve ayrıntılı bir görsel inceleme yapılmıştır. Yapılan görsel tespitler fotoğraflanarak belgelenmiştir.

Hasan Paşa Hanı'nda yapılan gözlemsel çalışmalar sonucunda bu yapıyı günde ortalama 1000 kişinin kullandığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu evren büyüklüğünde denekler homojen olarak kabul edildiğinde, %10 hata payı ön görülerek yapılan hesaplamalara göre Hasan Paşa Hanı için örneklem büyüklüğü 58 kişi olarak hesaplanmıştır (Can, 2014). Ancak evren büyüklüğü 58 kişi olmasına karşılık saha çalışmaları kapsamında 93 kişi ile anket yapılarak hata payının daha aza indirilmesi hedeflenmiştir. Hasan Paşa Hanı'nda yapılan anket çalışmalarından elde edilen verilerin analizi için SPSS İstatistik Veri Analizi Programı kullanılmıştır.

Anket çalışmalarından elde edilen veriler için her soru bağımsız olarak değerlendirilerek betimsel analizleri yapılmıştır. Birbirleri ile ilişkili olan sorular arasında kontrolü sağlamak amacı ile çapraz tablo analizleri yapılmıştır.

Kullanıcı memnuniyet seviyesinin belirlenmesine yönelik hazırlanan anket sorularında en düşük memnuniyet seviyesi 1 ve en yüksek memnuniyet seviyesi 5 olacak şekilde 1 ile 5 arasındaki bir değerlendirme baz alınmıştır. Bu çerçevede anket sonuçları incelendiğinde; genel olarak ortalama memnuniyet seviyesi 3.49 olarak bulunmuştur. Bu da 5 üzerinden değerlendirilen bir ankette ortalama 2,5 olan kullanıcı memnuniyet seviyesinin çok üzerinde genel bir memnuniyet olduğunu göstermektedir. Analiz kapsamında anketteki her bir soru 3.49 ortalama puanına göre değerlendirilerek ortalama memnuniyet seviyesine göre daha yüksek ve daha az olan sapmalar tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler ile yapının ve mekânların fiziksel durumu, yapının ulaşılabilirliği, alt yapı olanakları, kullanıcıların geleneksel yapıların

<sup>1</sup> Restorasyon: Çevre-yapı, yapı-mekan ilişkilerini dikkate alan, yapı formu ve malzemenin özgünlüğünü koruyan, geçmişin tarihi, kültürel, ekonomik ve estetik değerlerini koruyarak belgeleyen bilimsel temellere dayanan bir çalışmadır. (Birlik S. , 2006)

yeniden işlevlendirilmesine bakış açıları, kullanıcıların konfor beklenti seviyesi gibi faktörlerle kullanıcıların bakış açıları ve beklentileri belirlenmiştir.

## Bulgular

Alan çalışmasına ilişkin gözlemsel incelemeler ve kullanıcı beklentilerinin de belirlendiği kullanıcı memnuniyet seviyeleri aşağıda açıklanmıştır.

Hasan Paşa Hanı tarih boyunca önemli kervan yollarının kavşak noktasında bulunan Anadolu'nun güney doğusundaki en büyük kentlerden biri olan Diyarbakır'ın (Şekil.1) kent merkezinde bulunmaktadır. Osmanlı dönemindeki Diyarbakır Valilerinden Hasan Paşa tarafından 1572-1575 yılları arasında inşa ettirilen (Beysanoğlu, 1996) (Yavuz, 2011) (Yılmazçelik, 2010) (Yeşilbaş, 2015) bu han onun adıyla anılmaktadır. Onarımlar görenek günümüze ulaşan bu yapı Diyarbakır'ın en büyük hanlarından birisidir. Diyarbakır'ı ziyaret eden seyyahlar da bu yapı hakkında çok sayıda önemli bilgiler vermişlerdir. (Yılmazçelik, 1995) Örneğin XVII. Yüzyılda Diyarbakır'a gelen Evliya Çelebi yapının "Kale misali, gayet metin ve müstahkem bir yapı" olduğunu, 1612 yılında kente gelen Polonyalı Simeon, handa "Çok sayıda oda ve 500 beygiri barındırabilen yer altında iki büyük ahırının olduğundan" bahsederken (Karakaş & Karakaş, 2015) Buckingham'ın 1815 tarihi için verdiği bilgilerden yapının hububat borsası olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır (Karaca, 2014) (Kejanlı, 2009).

Kent son elli yıllık zaman diliminde aldığı göçler nedeni ile ciddi bir büyüme yaşamıştır. Bu genişleme nüfus yoğunluğunun tarihi kent merkezinden dışarıya doğru kaymasına neden olmuştur (Dalkılıç & Bekleyen, 2011). Günümüzde Hasan Paşa Hanı ve çevresi ticari değerini korumaya devam etmektedir. Yerinde yapılan gözlemsel incelemeler ve anket çalışmaları sonucunda elde edilen bilgilere göre Diyarbakır Hasan Paşa Hanı'nda aşağıdaki tespitlere ulaşılmaktadır.

## Gözlemsel analiz

Her yaştan kullanıcının çekim merkezi olan yapı, genel olarak dört farklı grup tarafından kullanılmaktadır. İlk kullanıcı grubunu iş yeri sahipleri ve çalışanlar, ikinci grubu kent sakinleri, üçüncü grubu turistik amaçlı kente gelen ziyaretçiler, dördüncü grubu ise hanı sadece geçiş güzergahını olarak kullanan kullanıcılar oluşturmaktadır.

Diyarbakır'ın Suriçi bölgesini ikiye ayıran Mardin Kapı ve Dağkapı'sını birbirine bağlayan Gazi Caddesi'ne bitişik Hasan Paşa Hanı, Suriçi'nin merkezinde bulunan Ulu Camii'nin tam karşısında konumlanmaktadır. Büyük bir revaklı avluya sahip olan yapının tüm odaları avlu çevresinde yer almaktadır. Gazi Caddesi'ne bakan ana girişinin (batı) dışında doğu ve güney yönlerindeki iki kapı ile bu yapı, kapalı çarşı ile bağlantılıdır (Şekil 1).

Düz bir satıh üzerine konumlanan bu han, kuzey-güney ekseninde uzayan dikdörtgen bir plan şemasına sahiptir. Geniş avlusunun tam ortasında altıgen bir şadırvan bulunmaktadır. Bodrum katına sonradan eklenen, birinci katında ise özgün yapısı günümüzde korunan ticari amaçla kullanılmaktadır. Özgün fonksiyonu hayvan barınağı olan hanın bodrum katı (Yıldırım, 2017), rampa ve merdivenlerle avluya bağlanmıştır. Ayrıca bu kat hem havalandırma hem de aydınlatma ihtiyacını karşılayan mazgallara sahiptir.

Üst kat birbirlerine bağlantılı dış (sokağa) ve iç cepheye (avluya) bakan ardışık olarak dizilen odalardan oluşmaktadır. Alt katta ise bu mekânsal bağlantıların birbirlerinden koparıldığı, mekanların bir kısmının avluya diğer kısmının ise dışarıya bağlantılı olan ticari mekânlardan oluştuğu görülmektedir. Hanın birinci katındaki odalar ağırlıklı olarak konaklamaya yönelik olup avludan çıkan dört ayrı merdiven ile üst kata bağlantı sağlanmaktadır. Bu merdivenler hanın batı girişi ile doğu girişinin sağ ve sol yanında simetrik bir şekilde yapılmışlardır. Üst kattaki odalar iki bölümden oluşmuştur. Revaklardan ilk girişteki bölümde basık, lento ile geçilmiş giriş kapısı, ocak ve revaklara açılan bir pencere bulunurken diğer bölüm bir pencere ile dışarı açılmaktadır.

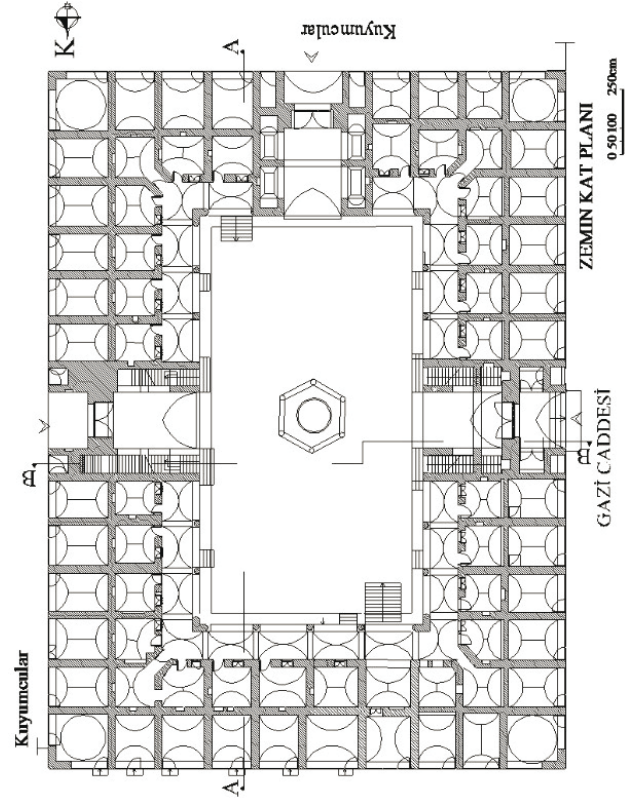
Revaklara bakan pencere güvenlik açısından lokmalı demir parmaklıklar ile kapatılmıştır. (Şekil.1)

Yapıda malzeme olarak kubbe ve tonozlarda 32x32x3 ebadındaki tuğla, cephelerde beyaz ve siyah kesme taş, diğer duvarlarda ise ahşap hatıllı moloz taş duvarlar ile dönemin yapı harcı olan horasan harcı kullanılmıştır.

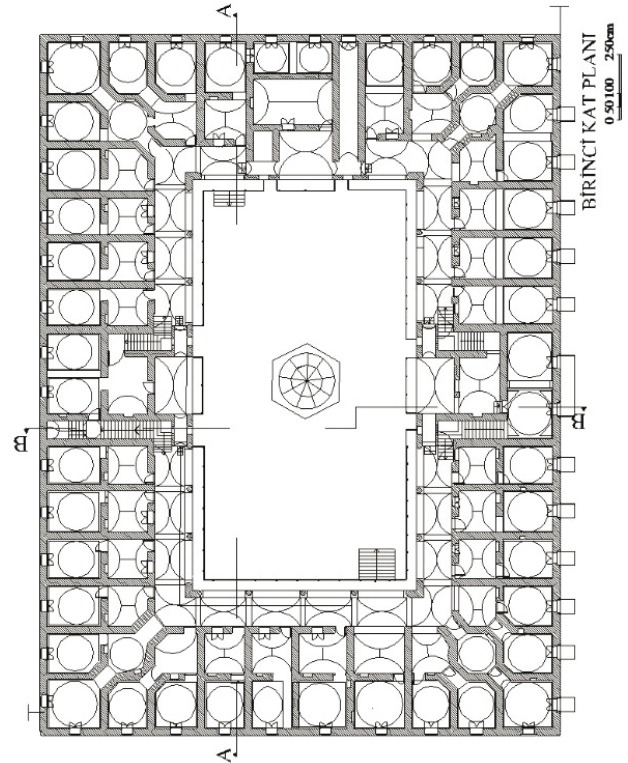
Yığma yapım tekniği inşa edilmiş olan Hasan Paşa Hanı bazalt taş duvarlar, bazalt alınlık ile yapılmış olan tuğla kemerler, tuğladan mamul tonoz ve kubbeler ile inşa edilmiştir. Zeminleri bazalt taş kaplama olan yapının moloz taş duvarları sıvanarak kireç badana ile boyanmıştır. Ana giriş kapıları orijinal olup ahşap iskelet üzerine demir saç kaplama şeklindedir. Mevcut oda kapı ve pencereleri ahşaptan yeni tekniklerle imal edilmiştir.

Tüm mekânlarda elektrik hattı ve aydınlatma sistemi bulunan yapıda belediyenin şebekesi tarafından beslenen su sadece belli bazı mekânlarda bulunmaktadır. Atık sular belediyenin merkezi toplama hattına bağlanmıştır. Ayrıca bir toplama sistemi bulunmadığı için yağmur suları kanalizasyon şebekesine bağlanmıştır. Telefon hattı ve wireless yayınları ile internet erişimine olanakların bulunduğu yapıda GSM operatörlerinin sunduğu hizmetler ile de telefon ve internet erişimine ulaşmak mümkündür.

Geleneksel yapılar yapım dönemlerine ait standartları taşıdıkları için taşıyıcı sistem açısından çoğu zaman yeterli güvenlik performansını sağlayabilirlerken acil güvenlik tedbirleri açısından bu kriterleri sağlamakta yetersiz kalmaktadırlar. Özellikle standart ölçülere sahip bir yangın merdiveni, acil çıkışlar, kapı ve geçişlerin boyutlandırılması gibi standartlara çoğu zaman uyum sorunu yaşanmaktadır. Bu yapı özelinde de yangın merdiveni, acil çıkışlar ve acil müdahalelerde yetersizlikler bulunmaktadır.



Şekil 1. Zemin Kat Planı (Yıldırım.2017)



Şekil 2. 1. Kat Planı (Yıldırım.2017)

Mülkiyeti Diyarbakır Vakıflar Bölge müdürlüğünün uhdesinde bulunan Hasan Paşa

Hanında yapılan çalışmaların tümünde adı geçen müdürlüğün izni alınmaktadır. Genel prensipler dışında kalan yapının genel işletmesi han yönetimi tarafından yürütülmektedir. Handa, hediyelik eşya, gümüşçü, kuyumcu, kahvaltıcı, kitapçı, kafe gibi hizmet sektöründe bulunan birbirileri ile ticari bağı olmayan farklı meslek gruplarından esnaflar bulunmaktadır.

Yapının kendine has bir otoparkı bulunmamaktadır. İşletmecilerin malzeme indirmesi, yapıya taşınması ve depolamasında ciddi yetersizlikler mevcuttur. Üst katlara ulaşımında asansör olmayışı, mevcut merdivenlerin dik ve dar basamaklı olması engelli ve yaşlı bireyler ile malzemelerin üst katlara ulaşımına çok kısıtlı bir şekilde imkan vermektedir. Teknik donanım açısından yapıda anons sistemi, kamera sistemi, yangın ihbar sistemi, yangın söndürme sistemi, yangın dolapları, yangın söndürme hortumları gibi sistemler bulunmamaktadır. Yapı tescilli olduğu için merkezi bir ısıtma ve soğutma sistemine sahip değildir. Mekanlar münferit olarak elektrik sobaları ve klimalar ile ısıtılmakta ve soğutulmaktadır. Geleneksel yapılar yapım dönemlerine ait standartları taşıdıkları için yangın merdiveni, acil çıkışlar ve acil müdahalelerde yetersizlikler bulunmaktadır.

Geleneksel han yapılarının yeniden işlevlendirilmesi süreci için örnek olarak seçilmiş olan Diyarbakır şehir içi hanlarından olan Hasan Paşa hanında hazırlanan gözlemsel incelemede verilen mevcut fonksiyona bağlı olarak yapının genelinde özgün kimliğine aykırı olan farklı müdahaleler tespit edilmiştir. Bu müdahaleler aşağıdaki gibidir;

Günümüz teknik ve teknolojik imkanlarının yapıya adaptasyonunda gereken özenin gösterilmediği görülmektedir. Yapının özgün kimliği göz ardı edilerek modern yapı malzemeleri günümüz yapım teknikleri

kullanılarak yapıya eklenmiştir. Dükkanlarda kullanılan alüminyum camekanlar, metal kepenkler, gölgelikler, vitrin düzenlemeleri, satış teşhir malzemeleri, duman bacası, yükseltilmiş kaldırım, bitkiler, kapı ve pencere doğramaları, eklenti doğramalar, pvc doğramalar, granit tezgah, mobilya dolaplar, zemin ve duvar kaplamaları yapının özgün tarihi kimliğini bozan modern yapı elemanları olarak tespit edilmektedir.

Yapıda özellikle esnafların iş yerlerini tanıtmak amacı kullandıkları tanıtım tabelaları ön plana çıkarken, malzemelerin tanıtımı ve reklamı için konulmuş olan tabelalar ile yönlendirme levhaları da ayrıca yoğun bir şekilde görsel kirlilik oluşturmaktadır. (Şekil.3,4,8,10,11)

Günümüz hijyen ve konfor seviyesinin yapıya taşınması sürecinde yapıya eklenen sıhhi tesisat elemanları ve su deposu ile beraber elektrik tesisat elemanları, klima dış üniteleri, soğutucular, klima elektrik ve gaz boruları, çanak antenler ve kabloları, plastik yağmur suyu iniş boruları gibi bir çok teknolojik eleman yapının özgün görünümünü bozacak şekilde yapıya eklenmiştir.

(Şekil.5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,16,17)

Özellikle işletmecilerin yapının iç mekanlarında otantik bir görünüm elde etmek amacı ile yaptıkları müdahaleler, kilim, resim ve manzara tabloları, işaret levhaları, satış teşhir amaçlı mobilyalar ve niteliksiz tefriş elemanları da yine yapının özgün kimliğini bozan elemanlar olarak tespit edilmektedir. (Şekil.5,6,7,9,10,15)

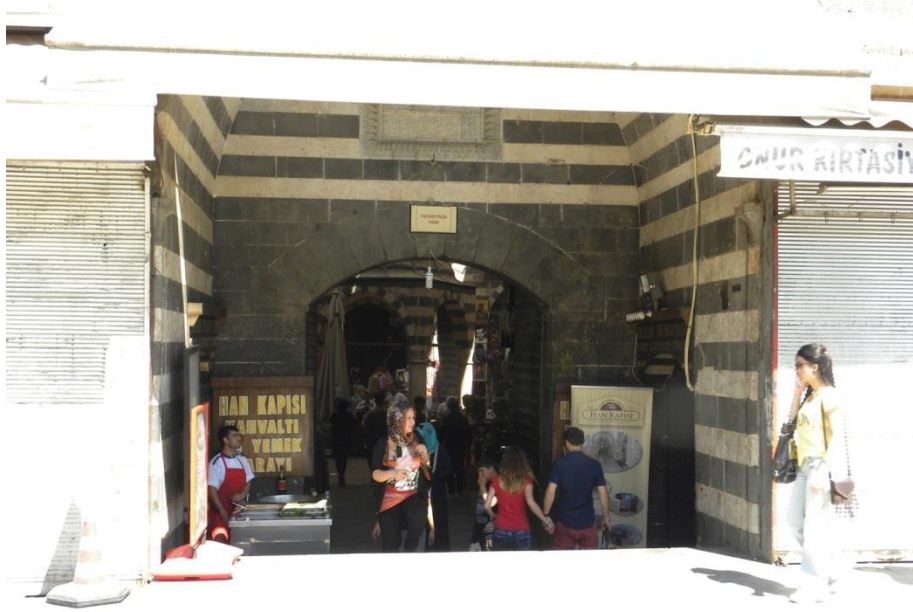
Yasal sınırlara uygun bir restorasyon sürecinin hemen sonrasında özellikle kullanıma açılır açılmaz Hasan Paşa Hanı'nın ciddi müdahalelere maruz kaldığı ve özgün kimliğine zarar verildiği yapılan gözlemlerle belirlenmiştir.



Şekil 3: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Gölgelikler, Tabelalar, Klima Dış Üniteleri, Plastik Yağmur İniş Boruları, Çanak Anten, Elektrik ve Telefon Kabloları, Metal Kepenkler, Alüminyum Camekanlar.



Şekil 4: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Çanak Anten, Klima Boruları, Kablolar, Gölgelikler, Tabelalar



Şekil 5:Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Klima Boruları, Elektrik Tesisatı, Sac Kepen, Tabelalar, Yükseltmiş Kaldırım.



Şekil 6: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Gölgelekler, Tabelalar, Bitkiler



Şekil 7: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Duman Bacası, Elektrik Tesisatı, Gölgelikler, Tabelalar, Satış Eşyaları



Şekil 8: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Duman Bacası, Soğutucular, Tabelalar, Elektrik ve Sıhhi Tesisat Elmanları, Satış Eşyaları.



Şekil 9: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Doğramalar, Tablolar



Şekil 10: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Gölgelekler, Tabelalar, Satış Eşyaları





Şekil 11: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Tesisat Elmanları, Metal Taşıyıcılar, Sac üst örtü, Klima Dış Ünitesi.



Şekil 12: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Raflar, Doğramalar



Şekil 13: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Raflar, Mobilyalar



Şekil 14: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik ve Sıhhi Tesisat Elmanları, Pvc Doğramalar, Zemin ve Duvar Kaplaması.



Şekil 15: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik ve Sıhhi Tesisat Elmanları, Pvc Doğramalar, Su Deposu



Şekil 16: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik Tesisatı, Gölgelekler, Tabelalar, Satış Eşyaları



Şekil 17: Özgün Dokuyu Bozan Eklentiler: Elektrik ve Sıhhi Tesisat Elmanları, Mobilya Dolaplar, Granit Tezgaz, Zemin Kaplaması.

### **Kullanıcı Değerlendirmeleri**

Elde edilen veriler istatistiksel olarak Şekil.18 de verildiği şekli ile incelendiğinde kullanıcıların büyük bir kısmı, Hasanpaşa Han'ının Diyarbakır kenti için simgesel bir değere sahip olduğunu desteklemektedir. Yapının estetik yapısının da kullanıcısı tarafından beğenildiği saptanmıştır. Çevresel gürültü ile peyzaj eksikliğinin ise kullanıcı memnuniyetini en fazla düşüren konular olduğu belirlenmiştir.

Kullanıcıların yapının genel görünümünden memnun olduğu, yapıyı lüks olarak değerlendirdiği, estetik açıdan uygun bulunduğunu, mekânların katlara göre uygun ve huzurlu olduğunu, şekil olarak ve kat yüksekliği açısından mekânlardan bir memnuniyetin söz konusu olduğu anket verilerinden anlaşılmaktadır. Yapıdaki onarımların aslına uygun olarak yapılması noktasında memnuniyet seviyesinin biraz düştüğü aynı şekilde restorasyon müdahalelerinin estetik açıdan uygun bulunmasında da yine ve memnuniyet seviyesinin düştüğü görülmektedir. Peyzaj açısından yapının yetersizliği açık bir şekilde görülürken yapının çevresindeki peyzajın yetersizliği kullanıcı tarafından çok daha bariz bir şekilde gösterilmektedir.

Yapı ve mekanlar can güvenliği açısından değerlendirildiğinde yapının can güvenliği açısından standart memnuniyet seviyesine yakın bir değere sahip olduğu ve güvenli olarak görüldüğü tespit edilmektedir. Merdivenlerin genişliği ve riht yüksekliklerinin ciddi oranda yetersiz olduğu ortalamanın çok altında kalan değerlerden anlaşılırken, ıslak mekânların ve kapıların boyutları, bu mekânların estetik görüntülerinin nispeten yetersizliği ortalama memnuniyet seviyesinin altındadır. Yapının mekânlarında kullanılmış olan döşeme ve duvar kaplamaları ile yapının genelinde kullanılmış olan malzemelerle ilgili memnuniyet seviyesinin iyi bir seviyede olduğu saptanmıştır. İklimlendirme açısından mekânların sıcaklığından ve serinliğinden memnuniyetin oldukça iyi bir seviyede olduğu bulunmuştur. Yapım döneminden kaynaklı olarak pencerelerin ve kapıların küçük olması nedeniyle ışık ihtiyacının karşılanması açısından memnuniyet seviyesinin nispeten daha düşük olduğu, aynı şekilde havalandırmanın yetersizliği nedeniyle de memnuniyet seviyesinin bir miktar düştüğü belirlenmiştir.

Çalışma saatlerinin uygunluğu, çalışan sayısının yeterliliği, hizmet almadaki bekleme süresi, hizmetin maliyeti, çeşitliliği, kalitesi, yapıda

sunulan teknolojik hizmetler ve müşteri mahremiyetine riayet etme konularında memnuniyet seviyesinin oldukça iyi olduğu saptanmıştır.

Yapıya ulaşılabilirlik noktasında yetersizliklerin olmasına karşılık toplu ulaşım araçlarının sunduğu avantajlardan dolayı göreceli olarak memnuniyet seviyesinin yüksek olduğu

görülürken, otopark ihtiyacının karşılanamaması bu konudaki memnuniyet seviyesini oldukça düşük seviyelere indirmektedir.

	ORTALAMA	SAPMA
YAPININ GENEL GÖRÜNÜMÜNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	3.48	-0.01
SİZCE BU MEKAN HUZURLUMU?	3.80	0.31
BU MEKANIN ŞEKLİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	3.94	0.45
BU YAPIYI LÜKS BULUYORMUSUNUZ?	3.38	-0.11
KAT YÜKSEKLİĞİNİ UYGUN BULUYORMUSUNUZ?	3.85	0.36
GİRİŞİ ESTETİK AÇIDAN UYGUN BULUYORMUSUNUZ?	3.74	0.25
YAPININ ÇEVRESİNE ESTETİK KATKISI VARMI?	4.46	0.97
YAPIYA ULAŞILABİLİRLİĞİ YETERLİ BULUYORMUSUNUZ?	3.91	0.42
YAPININ OTOPARK İMKANLARI YETERLİMİ?	2.56	-0.93
ÇALIŞMA SAATLERİNİ UYGUN BULUYORMUSUNUZ?	3.98	0.49
YAPIDAKİ ONARIMLAR ASLINA UYGUNMU?	3.25	-0.24
RESTORASYON MÜDAHALELERİ ESTETİKMİ?	2.90	-0.59
YAPININ BULUNDUĞU MAHALLENİN DOKUSU SİZCE ESTETİKMİ?	2.97	-0.52
BU TARİHİ YAPI İLİMİZ İÇİN NEKADAR SİMGESEL?	4.75	1.26
MEKANDA TEKNOLOJİK İHTİYAÇLARINIZ KARŞILANIYORMU?	2.97	-0.52
YAPININ ÇEVRESİNDEKİ YEŞİL ALANLAR YETERLİMİ?	2.03	-1.46
AVLUDAKİ PEYSAJ YETERLİMİ?	2.78	-0.71
ÜSTKATLARIN MERDİVEN GENİŞLİĞİ UYGUNMU?	2.67	-0.82
MERDİVENLERİN RIHT YÜKSEKLİĞİ YETERLİMİ?	2.79	-0.70
MEKANLARIN KONUMLARI KATLARA GÖRE UYGUNMU?	3.73	0.24
ISLAK HACİMLERİN KAPI BOYUTLARI UYGUNMU?	3.04	-0.45
ISLAK HACİMLERDEKİ MEKAN BOYUTLARI UYGUNMU?	3.26	-0.23
ISLAK HACİMLER GÖRSEL OLARAK UYGUNMU?	3.37	-0.12
YAPIDA KENDİNİZİ CANGÜVENLİĞİ AÇISINDAN GÜVENDE HİSEDİYORMUSUNUZ?	3.53	0.04
HİZMET ALAMA BEKLEME SÜRESİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	3.95	0.46
ÇALIŞAN SAYISINI YETERLİ BULUYORMUSUNUZ?	3.87	0.38
HİZMET MALİYETİNİ NASIL BULUYORSUNUZ?	3.90	0.41
HİZMET ÇEŞİTLİLİĞİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	4.11	0.62
HİZMET KALİTESİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	4.07	0.58
MÜŞTERİYE SUNULAN MAHREMİYETTEN MEMNUNMUSUNUZ?	4.03	0.54
MEKANIN DÖŞEME KAPLAMASINDAN MEMNUNMUSUNUZ?	3.74	0.25
MEKANIN DUVAR KAPLAMASINDAN MEMNUNMUSUNUZ?	3.76	0.27
MEKANIN GENEL SARF MALZEMELERİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	3.61	0.12
MEKANIN SICAKLIĞINDAN MEMNUNMUSUNUZ?	4.09	0.60
MEKANIN SERİNLİĞİNDEN MEMNUNMUSUNUZ?	4.07	0.58
MEKANI IŞIK AÇISINDAN UYGUN BULUYORMUSUNUZ?	3.72	0.23
YAPININ HAVASI KOKU AÇISINDAN UYGUNMU?	3.83	0.34
MEKANA DIŞARIDAN GÜRÜLTÜ GELİYORMU?	0.53	-4.47
GENEL ORTALAMA	3.49	

## Şekil 18. Kullanıcı memnuniyet seviyeleri ve ortalama sapma oranları

**Sonuç**

Bu çalışma ile insanlığın ortak kültürel değeri olan geleneksel yapıların korunması sürecine katkı sunmak öncelikle hedeflenmektedir. Bu kapsamda örneklem olarak seçilmiş olan Hasan Paşa Hanı'nda yapılan görsel analiz ve anket çalışmaları ile elde edilen verilerin yeni yapılacak olan restorasyon ve yeniden işlevlendirme uygulamalarında alınacak olan kararlara olumlu yönde katkı sunması beklenmektedir.

Yapılan görsel analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde yapının kapasitesinin çok üzerinde kullanıldığı, kullanıcıların konfor beklentilerinin ve yoğun ilgisinin karşılanabilmesi adına yapılan müdahalelerin yapıyı yozlaştırdığı ve özgün kimliğinden uzaklaştırdığı gözlemlenebilmektedir. Bu durum anket çalışmalarından elde edilen verilerde restorasyon müdahaleleri ve estetik görünüm ile ilgili sorulara verilen cevaplardaki memnuniyet seviyesinin ortalamanın altında çıkması ile teyit edilmektedir.

Yapının özellikleri dikkate alınarak iyi belirlenen bir işlev, geleneksel yapıların korunmasına ciddi oranda katkı sunacağı gibi onarım sonrası atıl durumda kalmasının önüne geçerek bu yapıların zaman içerisinde bakımsızlıktan yıpranarak yıkılması ve yok olmasının da önüne geçecektir.

Geleneksel yapı kullanıcıları genel olarak koruma prensiplerine uygun hareket etmemektedir. Bu durum, geleneksel yapıların özgün kimlikleri ile korunması ve verimli bir şekilde kullanılmasında olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Geleneksel yapılarda işletmeciler konumunda olan kullanıcılar mevcut müdahalelerin yapıya zarar vermediği görüşünde bulunurken, kullanıcıların diğer bir kısmı müdahalelerin zararlı ve görsel kirlilik oluşturduğu görüşünde bulunmaktadır. Bu çerçevede geleneksel yapıların etkili ve düzenli bir şekilde denetlenmemesinin en önemli nedeni, yetkisizlik olarak görülmektedir. Ülkemiz yasal mevzuatında onarım sonrası

geleneksel yapıların korunmasını sağlamak üzere etkin bir denetleme mekanizması öngörülmemektedir. Bu nedenle yapılar çoğu zaman kullanıcıların inisiyatifine bırakılmaktan kurtulamamaktadır. Araştırma sonuçları, geleneksel yapıların bir denetleme formu geliştirilerek, resmi kurum marifeti ile üç ayda bir denetlenmesi gerekliliğini öne çıkarmaktadır.

Geleneksel yapıların kullanıma açılmasındaki temel kriter, yapının yaşatılarak korunması olmalıdır. Bu nedenle belirli bir restorasyon süreci sonucunda yeniden işlevlendirilerek kullanıma açılan tarihi bir yapıda öncelik kullanıcı konfor beklentilerinden önce, yapının özgün kimliği ile korunması olmalıdır. Mekânların kullanıcı gereksinimlerine cevap verebilecek şekilde tasarlanması sürecinde yapının özgün kimliğinin bozulmaması prensibinden ödün verilmemelidir. Bu mekânlar geçmişe ait kimliklerini bozmadan günümüz kullanım koşullarına uyarlanmalıdır.

Geleneksel yapılar geçmişi ve bu günü ilişkilendirebileceğimiz, toplumun tarihsel gelişimini takip edebileceğimiz, kültürel etkileşimlerin yaşandığı mekanlara dönüştürüldüğü taktirde doğru tasarlanmış bir restorasyon ve işlevlendirme uygulamasından bahsetmek mümkün olacaktır.

**Kaynakça**

- Akın, C. (2001). Doğal Çevre Etmenlerine Bağlı Olarak, Yerleşme ve Bina Ölçeğinde İklimle Dengeli Konut Tasarım Denetleme Modeli, (Makale Yazarına ait Doktora tezi). İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi. ss.9
- Akın, C., Bekleyen, A., & Yıldırım, M. (2016). Preservation initiatives for the truncated pyramid-shaped traditional houses of Siirt. *Frontiers of Architectural Research* (Dergi), ss.360-370.
- Bekleyen, A., & Korkmaz, N. (2012). An Evaluation Of Akabe Mass Housing Settlement in Sanliurfa. *Journal of Housing and the Built Environment*, ss.293-309.
- Bekleyen, A., & Yılmaz-Ay, İ. (2016). Are gated communities indispensable. *Urbani İzziv* (Dergi), ss.149-161.

- Beysanoğlu, Ş. (1996). Anıtları ve Kitabeleri ile Diyarbakır Tarihi (Cilt 1). Ankara, Türkiye: Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi.
- Cebe, M. (2017). Bina Programı Hazırlanması; Güneydoğu Anadolu Han Yapıları Örneği. (Makale Yazarına ait Doktora tezi) Diyarbakır: Dicle Üniversitesi. ss.106-244
- Dalkılıç, N. (2008). Geleneksel Konutlarda Kullanıcı-Mekan İlişkisi:Midyat Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*,ss. 17-33.
- Dalkılıç, N., & Bekleyen, A. (2011). Geçmişin Günümüze Yansıyan Fiziksel İzleri; Diyarbakır Evleri. İ. Yıldız içinde, Medeniyetler Mirası Diyarbakır Mimarisi Diyarbakır (Kitap), Diyarbakır Valiliği. ss. 418
- Dinç, P. (2002). Problem Araştırmasından Mimari Değerlere Geçişte Bina Programlama. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi.*, ss.101-119.
- Karaca, N. (2014). Osmanlı Dönemi Diyarbakır Hanları Üzerine Bir İnceleme. *Yalova Sosyal Bilimler Dergisi*(8), 70.
- Karakaş, A., & Karakaş, E. (2015). Hanların Turizme Kazandırılması: Mardin, Diyarbakır Ve Şanlıurfa İl Merkezlerindeki Hanlar Üzerine Bir Çalışma. *Dicle Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 313.
- Kejanlı, T. (2009). Diyarbakır Hanları ve Kervansarayları. 1.Uluslararası Nebiler, Shabeler, Azizler ve Krallar Kenti Sempozyumu (s. 388). Diyarbakır: Diyarbakır Valiliği.
- Özkan Altınöz, M. (2014). 19.Yy Osmanlı Mimarisi'ndeki Oryantalizmin Endülüs Kaynağı Ve Sirkeci Garı'nın Değerlendirilmesi. *Turkish Studies - International Periodical for the Languages, Literature and History of Turkish or Turkic* Volume 9/10 Fall 2014, p. 837-852 ISSN: 1308-2140,
- Özen, N. (2009). Gap Bölgesinde Yaşanan Göçün Sürdürülebilirlik Bağlamında Konut Çevrelerinde Etkisi(Makale Yazarına ait Doktora tezi), Diyarbakır Huzurevleri Örneği. Akara: Gazi Üniversitesi. ss.28.
- Sanoff, H. (1992). İntegratign Programming, Evaluation abd Participation İn Design (Kitap). Newcastle: Athenaem Press Ltd. ss.4-11
- Talu, E. (1999). Mimar Anlam Beğeni (Kitap). İstanbul: Yem Yayın. ss.158-159
- Yavuz, A. (2011). Osmanlı Döneminde Diyarbakır Hanları. İ. Yıldız içinde, Medeniyetler Mirası Diyarbakır Mimarisi (s. 142-144).
- Yeşilbaş, E. (2015). Diyarbakırda Osmanlı Dönemi Şehirçi Hanları üzerine değerlendirme. *Belleten*, 881.
- Yıldırım, M. (2017). Kültürel turizm ve kültürel mirası koruma: Diyarbakır Hasan Paşa Hanı örneği. *Mühendislik Dergisi*, 336-344.
- Yılmazçelik, İ. (2010). Osmanlı Hakimiyeti Süresince Diyarbakır Eyaleti Valileri (1516-1838). *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10(1), 240.

**Yazar Notu:** Bu çalışma birinci yazar tarafından, ikinci ve üçüncü yazar danışmanlığında Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı'nda 2017 yılında tamamlanmış olan "Bina Programı Hazırlanması; Güneydoğu Anadolu Bölgesi Geleneksel Han Yapıları Örneği" isimli doktora tezinden üretilmiştir.

## **Evaluation of the refunctional hasan pasha khan after use**

### **Extended abstract**

*The fact that the intervention process to be applied to traditional structures has a comprehensive research infrastructure will increase the success rate of interventions in new designs. Considering this framework, observational review from research subjects constituting the infrastructure of the process of determining the new function and intervention boundaries that will be applied in traditional structures is considered as one of the first steps in the project design process. The data to be obtained from the observational investigation will determine the course of the study and the study. In the light of the information obtained from observational investigations, survey questions were prepared in order to determine the level of user satisfaction and user expectations were determined within the framework of field studies.*

*In order to determine the level of user satisfaction, the questionnaire questions were asked to give an assessment score of 1 to 5 with the lowest level of satisfaction and the highest with 5 points. In this context, when the survey results are examined; average satisfaction level is 3.49. This shows that there is an overall satisfaction level of more than 2.5 user satisfaction levels in an average of 5 surveys. Within the scope of the analysis, each question in the questionnaire was evaluated according to the 3.49 average score and higher and lesser deviations were determined compared to the average satisfaction level.*

*When the data obtained as a result of the calculations made within the framework of the statistics rules are examined, it is seen that most of the users think that Hasanpaşa Han has a symbolic value for Diyarbakır city. The aesthetic appearance and shape of the building is also highly appreciated. In the same way, there is a lack of noise and landscaping in the areas where the dissatisfaction falls the most.*

*It is understood from the survey data that the places where the users are satisfied with the general appearance of the building as aesthetically appropriate considering the building as aesthetically appropriate, and that the spaces are suitable and peaceful according to the floors, and that there is a*

*satisfaction from the spaces in terms of shape and floor height. In the same way that the level of satisfaction in the construction of the repairs in the structure is slightly reduced, it is seen that the restoration interventions are found to be suitable in terms of aesthetics and the level of satisfaction has decreased. While the insufficiency of the structure is clearly seen in terms of landscaping, the insufficiency of the landscape around the structure is much more obvious by the user.*

*When the buildings and places are evaluated in terms of life safety, it is determined that the structure has a value close to the standard satisfaction level and it is seen as safe. While the width of the stairways and the height of the docks are significantly insufficient, it can be understood from the values that are far below the average, the size of the wet spaces and the gates, and the relatively inadequate appearance of the aesthetic appearance of these rooms can be seen with the ratio below the average satisfaction level. The level of satisfaction with the floor coverings and wall coverings used in the construction of the building is quite good and the level of satisfaction with the materials used throughout the building is at a good level. In terms of air conditioning, it is seen that the satisfaction of the temperature and the coolness of the rooms is at a very good level. Due to the fact that the windows and doors are small due to the construction period, the satisfaction level is relatively low in terms of meeting the light requirement and the satisfaction level decreases slightly due to insufficient ventilation.*

*Satisfaction of working hours It is seen that the number of employees has a satisfactory level of service waiting time, cost of service, service diversity, quality of service, technological services provided in the structure and respecting customer privacy.*

*Despite the lack of accessibility to the structure, due to the advantages offered by public transportation vehicles, the level of satisfaction is relatively high, while the need for parking cannot be met.*

*The aim of this study is to contribute to the process of protecting the traditional cultural structures of humanity. The data obtained through the visual analysis and survey studies carried out at the Hasan Pasha Inn, which is selected as a sample in this context, is expected to contribute positively to the*



*decisions to be made in the new restoration and re-functionalization applications.*

*When the data obtained from the visual analyzes are examined, it is seen that the structure is used in a way that is much more than the capacity of the building, and that the interventions made in order to meet the comfort expectations and intense interest of the users have corrupted the structure and removed it from its original identity. This situation is confirmed by the fact that the satisfaction level of the answers given to the questions about restoration interventions and aesthetic appearance in the data obtained from the survey studies is below the average.*

*Taking into consideration the characteristics of the building, a well-designed function will contribute significantly to the preservation of traditional buildings and will prevent them from being kept idle after the repair and will prevent the destruction and destruction of these structures from maintenance.*

*Traditional construction users generally do not comply with the protection principles. This situation creates negative effects on the preservation and efficient use of traditional structures with their original identities. Users in the traditional structure of the existing interventions do not harm the structure, while the other users, some of the users of the interventions are harmful and visual pollution is in the opinion. In this context, the most important reason for the inability to control the traditional structures effectively and regularly is seen as lack of jurisdiction. An effective monitoring mechanism is not envisaged in our country's legislation to ensure the protection of traditional structures after repair. For this reason, structures can not be left to the initiative of the users most of the time. According to the results of the research, an inspection form has been developed for the inspection of traditional structures and the necessity of auditing these structures with quarterly supervision is emphasized.*

*The main criterion for the opening of the traditional structures should be the preservation and preservation of the structure. For this reason, in a historical structure that has been re-functionalized as a result of a certain restoration process, priority should be provided with the original identity of the structure before the user comfort expectations. The principle that the original identity of the structure should not be compromised in the process of*

*designing the spaces to meet the user requirements should not be compromised. These spaces must be adapted to the present conditions of use without disturbing their past identities.*

*It will be possible to talk about the restoration and functionalization of traditional structures, when we can relate the history and the historical development of the society and transform into places where cultural interactions are experienced.*

**Keywords:** *Hasan Pasha Khan, Design, Re-Functioning, Observational Analysis, Survival Protection*

## Temiz Su Koşulları Altında Dairesel Köprü Ayaklarının Etrafındaki Nihai Oyulma Derinliklerinin Deneysel Araştırılması

### *Experimental Investigation of Final Scour Depths Around Circular Bridge Piers Under Clear-Water Conditions*

Fırat Gümgüm<sup>1\*</sup>, Ayşegül Ö. Aksoy<sup>2</sup>, M. Şükrü Güney<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, [firat.gumgum@dicle.edu.tr](mailto:firat.gumgum@dicle.edu.tr)

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, [aysegul.ozgenc@deu.edu.tr](mailto:aysegul.ozgenc@deu.edu.tr)

<sup>3</sup> İzmir Ekonomi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, [sukru.guney@izmirekonomi.edu.tr](mailto:sukru.guney@izmirekonomi.edu.tr)

#### MAKALE BİLGİLERİ

*Makale geçmişi:*

Geliş: 27 Haziran 2019  
Düzeltilme: 5 Temmuz 2019  
Kabul: 8 Ağustos 2019

*Anahtar kelimeler:*

Köprü ayağı, yerel oyulma, temiz su oyulması, kararlı akım

#### ÖZET

Bu deneysel çalışmada, TÜBİTAK 109M637 projesi kapsamında inşa edilen hareketli tabanlı doğrusal kanalda kararlı akım şartlarında dairesel kesitli köprü ayakları etrafındaki nihai temiz su oyulması incelenmiştir. Deneysel çalışmada 4 farklı boyutlu dairesel köprü ayağı ve 3,47 mm ortalama tane çapına sahip üniform taban malzemesi kullanılmıştır. Ultrasonik hız profilleycisi yardımıyla ölçülen oyulma derinlikleri, literatürdeki mevcut bağıntılardan elde edilen oyulma derinlikleri ile karşılaştırılmış ve oyulma derinliği ile ilişkili bazı parametrelerin oyulma derinliğine olan etkisi incelenmiştir. Çeşitli regresyon analizleri sonucu nihai temiz su oyulma derinliğini tahmin eden bir bağıntı önerilmiş ve istatistiksel olarak anlamlı parametreler elde edilmiştir. En yüksek oyulma derinliğinin ayağın memba bölgesinde meydana geldiği gözlenmiştir. Akım şiddeti, yoğunluk farkı esaslı dane Froude sayısı ve köprü ayak çapı arttıkça oyulma derinliğinin arttığı tespit edilmiştir.

*Doi: 10.24012/dumf.583208*

#### ARTICLE INFO

*Article history:*

Received: 27 June 2019  
Revised: 5 July 2019  
Accepted: 8 August 2019

*Keywords:*

Bridge pier, local scour, clear water scour, steady flow

#### ABSTRACT

In this experimental study, final scour depths around circular bridge piers under clear-water conditions were investigated within the scope of the project TÜBİTAK 109M637. Circular bridge piers with 4 different diameters and uniform bed material having median diameter of 3.47 mm were used during the experiments. The scour depths measured by means of ultrasonic velocity profilers were compared with the scour depths obtained from the present equations in the literature and the effect of some parameters related to scour depth was investigated. As a result of various regression analyses, an equation was proposed to predict the final scour depth and statistically significant parameters were obtained. The highest scour depth was observed in the upstream side of the pier. It has been found that the scour depth increases with increasing flow intensity, densimetric particle Froude Number and pier diameter.

\* Sorumlu yazar / Correspondence  
Fırat GÜMGÜM  
✉ [firat.gumgum@dicle.edu.tr](mailto:firat.gumgum@dicle.edu.tr)

## Giriş

Bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Köprü ayakları etrafındaki yerel oyulmanın gelişimi karmaşık bir süreçtir ve bu konuda çok fazla çalışma olmasına rağmen hâlâ araştırmacıları ilgilendirmektedir.

Melville ve Sutherland (1988) önceki çalışmalardan elde edilen deneysel verileri kullanarak üniform dağılımlı katı madde (sediment) için hem temiz su hem de hareketli taban nihai oyulma derinliklerini tahmin eden bir denklem önermişlerdir. Melville (1997) bu çalışmaları farklı şekillerde köprü orta ve yan ayakları için üniform ve üniform olmayan sediment kullanarak sürdürmüştür. Richardson and Davis (2001), geçmişte yapılan deneysel çalışmalara ait verileri değerlendirerek, farklı tipte köprü orta ayakları etrafında nihai temiz su ve hareketli taban oyulmasını tahmin eden bir bağıntı önermişlerdir. Oliveto ve Hager (2002), üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak dairesel köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş, çalışmalarının sonucunda temiz su oyulması şartlarında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir bağıntı önermişlerdir. Sheppard vd. (2004), üniform taban malzemesi kullanarak köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmasını deneysel olarak incelemiş ve nihai oyulma derinliğini veren bir bağıntı önermişlerdir. Oliveto ve Hager (2005), köprü orta ve yan ayakları ve mahmuzlar etrafında oluşan yerel oyulmaları deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca köprü orta ayakları etrafında taşkın hidrografları sırasında meydana gelen yerel oyulmanın zamana bağlı değişimini veren bir yöntem önermişlerdir. Kothyari vd. (2007), temiz su oyulmasının zamana bağlı gelişimini hesaplamak için yeni bir bağıntı geliştirmişlerdir. Lai vd. (2009), kararlı ve kararsız akım koşullarında, üniform ve üniform olmayan taban malzemesi kullanarak köprü orta ayağı etrafındaki temiz su oyulmasının zamana bağlı değişimini tahmin eden bir yöntem önermiştir.

Bu çalışmada, dairesel köprü ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulması, deneysel olarak araştırılmış ve literatürdeki mevcut bağıntularla karşılaştırılmıştır.

## Köprü Ayakları Etrafındaki Yerel Oyulma

Oyulma kavramı, genel olarak taban malzemesinin tabandan veya tabana inşa edilmiş bir yapının etrafından ayrılması ve sürüklenmesi olarak tanımlanır. Yerel oyulma ise oyulmanın direkt olarak akıma müdahale eden bir yapıdan (köprü ayağı, köprü yan ayağı, açık kanal birleşimi vs) kaynaklanması ile ifade edilir.

Yaklaşan akım köprü ayağına ulaştığında ayağın memba kenarında kabarrır ve bu noktada yüksek basınç oluşturur. Yüzeydeki yüksek basınçtan dolayı tabana doğru dikey bir akım oluşur. Chiew (1984) ve Raudkivi (1986), bu dikey akımı yerel oyulmanın başlıca nedeni olarak tanımlamıştır. Yaklaşan akımın dikey akım ile etkileşime girmesi sonucu ise at nalı çevrintileri meydana gelir. Dikey akımdan kaynaklanan ve başlangıçta küçük olan oyulma çukuru, at nalı çevrintilerinin oluşması ile birlikte hızla genişler ve oyulma çukuru genişledikçe at nalı çevrintilerinin etkisi azalmaya başlar (Melville, 1975). Kısacası, oyulmayı ilk olarak yüzeyden tabana doğru hareket eden dikey akım başlatır ve meydana getirdiği küçük çukurun içinde gelişen at nalı çevrintileri ile birlikte oyulma çukuru önemli ölçüde genişler. Bununla birlikte ayağın yanlarından süzülen akım ise ayağın mansap bölgesinde görece daha zayıf olan kuyruk çevrintilerini oluşturur. Melville (1975), kuyruk çevrintilerini taban malzemesini mansap bölgesine çeken bir elektrikli süpürgeye benzetmiştir.

Oyulmalar, tabanda malzeme hareketi olup olmamasına göre iki ayrı başlık altında incelenmektedir. Akımın tabanda yarattığı kayma gerilmesinin taban malzemesinin kritik kayma gerilmesinden küçük olması durumunda tabanda malzeme hareketi meydana gelmez. Bu koşul altında meydana gelen oyulmalar temiz su oyulması olarak adlandırılır. Akımın tabanda yarattığı kayma gerilmesinin taban malzemesinin kritik kayma gerilmesinden büyük olması durumunda ise tabanda malzeme hareketi meydana gelir ve taşınan malzeme, oyulma çukurunu doldurmaya başlar. Bu koşul altında

meydana gelen oyulmalar ise hareketli taban oyulması olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada dairesel en kesitli köprü orta ayakları etrafında meydana gelen temiz su oyulmaları deneysel olarak incelenmiştir.

boyunca devam etmesi gerekiyor olsa da Yanmaz (2002), laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerde bu sürelerin çok uzun olduğunu, Froude modelinde 1/50 ölçekte inşa edilen bir kanalda 50 saat süren bir deneyin doğada 354 saate tekabül edeceğini belirtmiştir.

Tablo 1. Temiz su denge oyulma derinliğini tahmin eden bağıntılar  
Table 1. Equations predicting the equilibrium clear-water scour depth

Araştırmacı	Bağıntı	No.
Laursen (1958)	$\frac{d_s}{b} = 1,34 \left( \frac{y}{b} \right)^{0,5}$	(1)
Hancu (1971)	$\frac{d_s}{b} = 2,42 \left( \frac{y}{b} \right)^{1/3} Fr^{2/3}$	(2)
Breusers vd. (1977)	$\frac{d_s}{b} = 2 \tanh \left( \frac{y}{b} \right)$	(3)
Günyaktı (1988)	$\frac{d_s}{b} = 1,183 \left( \frac{y}{b} \right)^{0,471}$	(4)
Yanmaz (1989)	$\frac{d_s}{b} = 0,85 \left( \frac{y}{b} \right)^{0,686}$	(5)
Melville (1977)	$d_s = K_{yw} K_I K_d K_s K_\theta K_G$	(6)
Richardson ve Davis (2001)	$\frac{d_s}{b} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{y}{b} \right)^{0,35} Fr^{0,43}$	(7)
Oliveto ve Hager (2002)	$\frac{d_s}{z_R} = 0,068 N \sigma_g^{-1/2} F_d^{1,5} \log(T)$	(8)
Sheppard vd. (2004)	$\frac{d_s}{b^*} = 2,5 \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$	(9)
Kothyari vd. (2007)	$\frac{d_s}{z_R} = 0,272 \sigma_g^{-1/2} (F_d - F_{d\beta})^{2/3} \log T$	(10)
Lai vd. (2009)	$\frac{d_s}{b} = \alpha K \left( \frac{b}{d} \right) K \left( \frac{y}{b} \right) \left( \frac{V}{V_c} - I_{vc} \right)$	(11)

Temiz su oyulması durumunda meydana gelen oyulmalarda oyulma derinliğinin ulaşabileceği en yüksek mertebe denge oyulma derinliği olarak tanımlanmıştır. Denge oyulma derinliğine ulaşılabilmesi için deneyler çok uzun süre almakta ve hatta günler boyunca sürebilmektedir. Melville ve Chiew (1999), denge oyulma derinliğine son 24 saatte meydana gelen oyulmanın ayak çapının %5'inden büyük olmaması durumunda ulaşılmış olacağını belirtmiştir. Her ne kadar denge oyulma derinliğine ulaşılabilmesi için deneylerin günler

### Literatürdeki Mevcut Bağıntılar

Literatürde denge oyulma derinliğini tahmin etmekte kullanılan bazı bağıntılar, Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'deki bağıntılarda  $d_s$ , denge oyulma derinliğini;  $y$ , yaklaşan akım derinliğini;  $b$ , ayak genişliğini;  $Fr$ , Froude sayısını;  $V$ , yaklaşan akım hızını ve  $V_c$  taban malzemesi hareketi için ulaşılması gereken eşik hızını göstermektedir.  $V_c$  kritik hız değeri, Melville (1999)'de verildiği gibi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{V_c}{u_c} = 5,75 \log \left( 5,53 \frac{y}{d_{50}} \right) \quad (12)$$

Bu ifadede  $u_c$  kritik kayma hızı olup,  $d_{50}$  medyan tane boyutu esas alınarak Shields diyagramından bulunabilir. Ancak pratik olması açısından Melville (1997),  $u_c$  değerini hesaplamak için  $u_c$  (m/s) ve  $d_{50}$  (mm) cinsinden olmak üzere Shields diyagramını aşağıdaki denklem takımına dönüştürmüştür:

$$u_{*c} = 0,0115 + 0,0125d_{50}^{1,4} \quad \text{eğer } 0,1 \text{ mm} < d_{50} < 1 \text{ mm} \quad (13a)$$

$$u_{*c} = 0,0305d_{50}^{0,5} - 0,0065d_{50}^{-1} \quad \text{eğer } 1 \text{ mm} < d_{50} < 100 \text{ mm} \quad (13b)$$

Melville (1997)'in (6) bağıntısında  $K_{yw}$  derinlik ( $y$ ) boyutu faktörü, göreceli yaklaşan akım derinliğine ( $y/b$ ) bağlı olarak tanımlanmıştır. Orta ayak için bu katsayı,  $K_{yb}$  indisi ile gösterilmektedir.

$$K_{yb} = 2,4b \quad \text{eğer } b/y < 0,7 \quad (14a)$$

$$K_{yb} = 2\sqrt{yb} \quad \text{eğer } 0,7 < b/y < 5 \quad (14b)$$

$$K_{yb} = 4,5y \quad \text{eğer } b/y > 5 \quad (14c)$$

$K_I$  akım şiddeti faktörü, üniform malzemeler için  $K_I = V/V_c$  olarak ifade edilmiştir.  $K_d$  tane boyutu faktörü, göreceli tane çapına ( $b/d_{50}$ ) bağlı olarak tanımlanmıştır.

$$K_d = 0,57 \log(2,24b/d_{50}) \quad ; b/d_{50} \leq 25 \quad (15a)$$

$$K_d = 1 \quad ; b/d_{50} > 25 \quad (15b)$$

$K_s$  ayak şekil faktörü, dairesel silindirik ve yuvarlak uçlu ayaklar için 1, kare uçlu ayaklar için 1,1, sivri uçlu ayaklar için 0,9 olarak önerilmiştir.  $K_\theta$  ayak doğrultu faktörü, dairesel ayaklar için  $K_\theta = 1$  olarak önerilmiştir.  $K_G$  kanal geometrisi faktörü orta ayaklar için  $K_G = 1$  olarak önerilmiştir.

Richardson ve Davis (2001)'in bağıntısındaki  $K_1$  ve  $K_2$  faktörleri sırasıyla  $K_s$  ve  $K_\theta$ 'ya eşit olup,  $K_3$  ve  $K_4$  faktörleri temiz su oyulması için 1 alınabilir.

Oliveto ve Hager (2002)'nin bağıntısındaki  $N = K_s$  şekil faktörü;  $\sigma_g$  taban malzemesinin geometrik standart sapması;  $F_d$ , yoğunluk farkı esaslı dane Froude sayısı  $F_d = V/(g'd_{50})^{0,5}$ ;  $g'$  göreceli yer çekimi ivmesi  $g' = [(\rho_s - \rho)/\rho]g$ ;

$\rho_s$  ve  $\rho$  sırasıyla taban malzemesinin ve akışkanlık yoğunlukları,  $T$  göreceli zaman  $T = [(g' - d_{50})^{0,5}/z_R]t$ ;  $z_R$  referans uzunluğu  $(yb^2)^{1/3}$ .

Sheppard ve diğ. (2004)'in önerdiği bağıntıdaki  $f_1$ ,  $f_2$  ve  $f_3$  faktörleri,  $b^* = K_s \cdot b$  olmak üzere aşağıdaki verildiği gibidir:

$$f_1 = \tanh \left[ \left( \frac{y}{b^*} \right)^{0,4} \right] \quad (16a)$$

$$f_2 = 1 - 1,75 \left[ \ln \left( \frac{V}{V_c} \right) \right]^2 \quad (16b)$$

$$f_3 = \left( \frac{b^*/d_{50}}{0,4(b^*/d_{50})^{1,2} + 10,6(b^*/d_{50})^{-0,13}} \right) \quad (16c)$$

Kothyari vd. (2007)'nin bağıntısındaki  $F_{d\beta}$ , oyulma başlangıcı için yoğunluk farkı esaslı tane Froude sayısıdır ve dairesel köprü ayakları için aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir:

$$F_{d\beta} = \left[ F_{di} - 1,26 \beta^{1/4} \left( \frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1/6} \right] \sigma_g^{1/3} \quad (17)$$

Burada  $R_h$  hidrolik yarıçaptır.  $B$  akarsu taban genişliği olmak üzere  $\beta = b/B$  bağıntısıyla hesaplanabilir.  $F_{di}$ ,  $\nu$  kinematik viskozite ve  $D_*$  boyutsuz tane çapı  $D = (g'v^2)^{1/3}d_{50}$  olmak üzere aşağıdaki denklem seti ile hesaplanabilir:

$$F_{di} = 1,08D_*^{1/12} \left( \frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1,6} \quad \text{eğer } D_* \leq 10 \quad (18a)$$

$$F_{di} = 2,33D_*^{-0,25} \left( \frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1,6} \quad \text{eğer } 10 < D_* < 150 \quad (18b)$$

$$F_{di} = 1,65 \left( \frac{R_h}{d_{50}} \right)^{1,6} \quad \text{eğer } D_* > 150 \quad (18c)$$

Lai vd. (2009), bağıntılarındaki  $\alpha$  ve  $I_{vc}$  değerlerini sırasıyla 3,9 ve 0,4 olarak önermişlerdir. Burada  $I_{vc}$  oyulmanın başlaması için gereken akım şiddeti ( $V/V_c$ ) değeridir. Bağıntıdaki diğer katsayılar aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$K\left(\frac{b}{d}\right) = 0,398 \ln\left(\frac{b}{d_{50}}\right) - 0,034 \left[ \ln\left(\frac{b}{d_{50}}\right) \right]^2$$

eğer  $1 \leq b/d_{50} < 50$  (19a)

$$K\left(\frac{b}{d}\right) = 1 \text{ eğer } b/d_{50} \geq 50 \quad (19b)$$

$$K\left(\frac{y}{b}\right) = 0,783 \left(\frac{y}{b}\right)^{0,322} - 0,106$$

eğer  $0 < y/b < 3$  (20a)

$$K\left(\frac{y}{b}\right) = 1 \text{ eğer } y/b \geq 3 \quad (20b)$$

### Deney Düzenegi

Deneyler, 18,6 m uzunluğa, 0,80 m genişliğe ve 0,75 m derinliğe sahip dikdörtgen doğrusal bir kanalda gerçekleştirilmiştir. Kanal tabanı 25 cm kalınlıkta olacak şekilde  $d_{50} = 3,47$  mm medyan tane büyüklüğüne ve  $\sigma_g = 1,39$  geometrik standart sapmaya sahip taban malzemesi ile kaplanmıştır. Deneylerde 4 cm, 8 cm, 15 cm ve 20 cm çaplarında 4 farklı dairesel ayak kullanılmıştır. Deney düzeneginin genel görünümü Şekil 1a ve 1b'de verilmiştir. Sedimentin granülometrik eğrisi, Şekil 2'de verilmektedir.

Akım kanala bir hız kontrol cihazına bağlı, maksimum debisi 100 L/s olan bir pompa ile iletilmektedir. Hız kontrol cihazı, bir bilgisayar programı yardımı ile pompa devir sayısını istenilen sürede istenilen değere getirebilmektedir. Kanalın mansabına ulaşan akım, buradan 27 m<sup>3</sup> hacimli bir hazneye savaklanmakta ve devir daim ile yeniden kanala iletilmektedir.

6 saat süren deneyler süresince oyulma derinliği, köprü ayağı etrafına yerleştirilen UVP (Ultrasonic Velocity Profiler) transdüserleri ile zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Met-Flow firmasının ürettiği bu cihazın asıl amacı akustik yöntemle hız ölçümüdür. Her ne kadar UVP algılayıcıları bir doğrultu boyunca hız profilini çıkarmak için kullanılmaktaysa da bu çalışmada tabandan yansıyan dalgalar değerlendirilerek, taban kotundaki değişimlerin ölçülmesinde kullanılmıştır. Cihazın ölçtüğü veriler eşzamanlı olarak bilgisayara kaydedilebilmektedir. Cihaza aynı frekanslı olmak koşuluyla, birden fazla transdüser bağlanabilmektedir. UVP

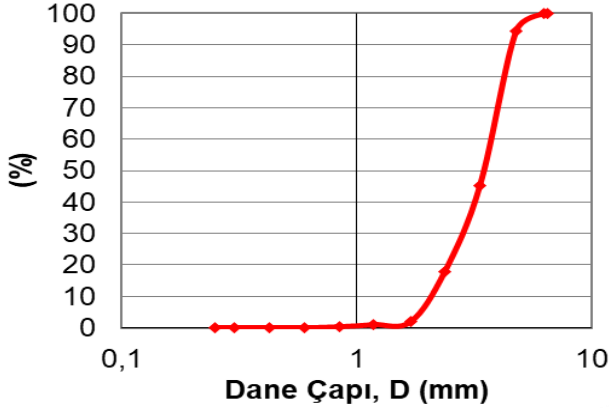
transdüserleri, Şekil 3'te gösterildiği gibi köprü ayağı etrafına yerleştirilmiştir. UVP transdüserlerinin oyulma derinliğine olan etkisi ihmal edilmektedir.



Şekil 1. a) ve b) Deney düzeneginin genel görünüşü

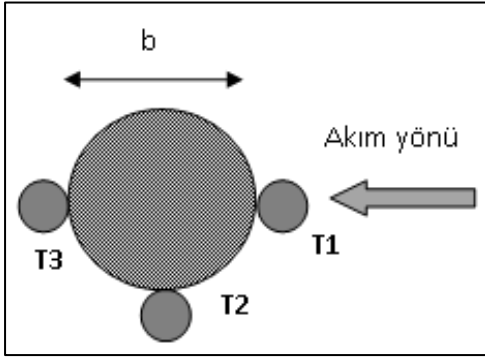
Figure 1. a) and b) General view of the experimental setup

Yaklaşan akım derinliği, hassasiyeti  $\pm 1$  mm olan ULS (Ultrasonic Level Sensor) cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yaklaşan akım hızı, debimetre ile ölçülen debi ve ULS ile belirlenmiş olan yaklaşan akım derinlikleri yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 2. Kullanılan taban malzemesinin dane dağılım eğrisi

Figure 2. Granulometric curve of the bed material



Şekil 3. Köprü ayağı etrafında yerleştirilen transdüserler

Figure 3. Placement of the transducers around bridge pier

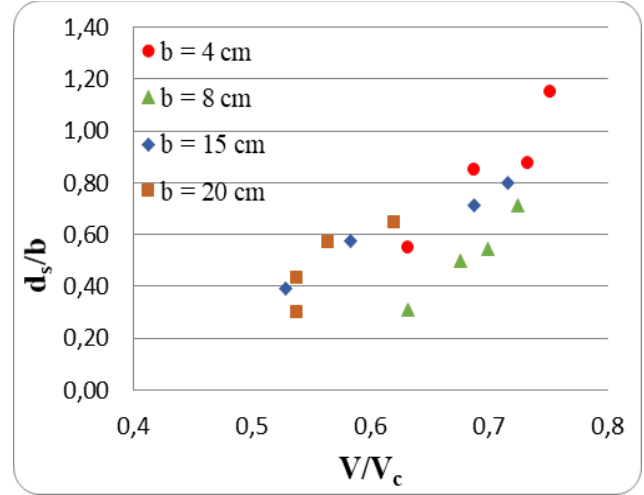
### DeneySEL Bulgular

Deneyler, 4 cm (D4), 8 cm (D8), 15 cm (D15) ve 20 cm (D20) çaplara sahip dairesel köprü ayakları ve üniform taban malzemesi kullanılarak farklı debilere sahip akımlarda gerçekleştirilmiş ve nihai oyulma derinlikleri elde edilmiştir. En yüksek oyulma derinliklerinin ayağın memba yönünde oluştuğu gözlenmiştir. Her bir deney sonucu elde edilen oyulma derinlikleri, deneye ait parametreler ile birlikte Tablo 2’de verilmektedir. Deney adının ilk rakamı ayak çapını, ikinci rakamı deney numarasını temsil etmektedir.

### DeneySEL Bulguların İrdelenmesi ve Literatür ile Karşılaştırılması

DeneySEL bulgular, bir yandan farklı deney şartları göz önüne alınarak kendi aralarında yorumlanmış, diğer yandan da ölçülen değerler

literatürde verilen formüller kullanılarak elde edilen sayısal değerlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4’te bu çalışmanın sonucunda elde edilen akım şiddeti ile ölçülen boyutsuz oyulma derinliğinin değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi aynı köprü ayağı çapında akım şiddeti arttıkça oyulma derinliğinin arttığı gözlenmiştir. 15 cm çaplı köprü ayağının kullanıldığı bir deney sonrasına ait görsel Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 4. Deneylerde elde edilen boyutsuz oyulma derinliğinin akım şiddeti ile değişimi

Figure 4. Variation of measured dimensionless scour depths with flow intensity

Ölçülen boyutsuz oyulma derinliklerinin göreceli dane boyutuna ( $b/d_{50}$ ) bağlı olarak değişimi Şekil 6’da verilmektedir. Melville (1997), oyulma derinliğinin,  $b/d_{50}$ ’nin 25’ten büyük değerlerinde dane çapından bağımsız olduğunu söylemiştir. Bu değer Ettema (1980)’nin yaptığı çalışma sonucunda 50 olarak verilmektedir. Şekil 6’da görüldüğü üzere  $b/d_{50} > 25$  değerlerinde oyulma derinliğinin etkilendiği görülmektedir. DeneySEL bulguların Melville (1997)’in önerdiği sınır değerle uyuşmadığı tespit edilmiştir.

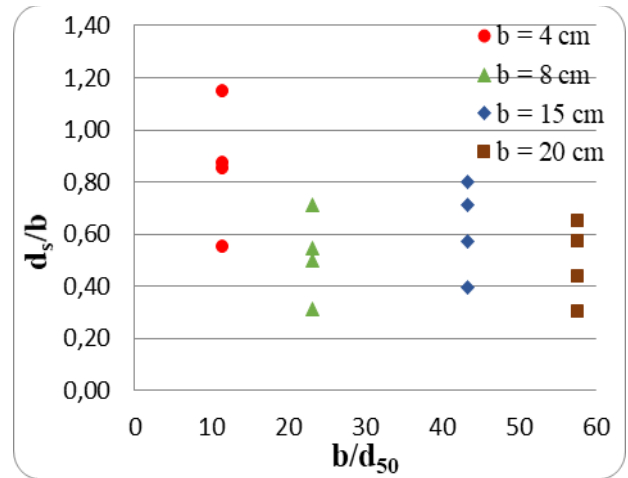
Tablo 2. Ölçülen oyulma derinlikleri  $d_m$  ve deneysel parametrelerTable 2. Measured scour depths  $d_m$  and experimental parameters

Deney No.	b (cm)	Q (L/s)	y (cm)	V/V <sub>c</sub>	Fr	$d_m$ (cm)
D4-1	4	52	13,5	0,65	0,42	2,20
D4-2	4	59	14,7	0,67	0,42	3,40
D4-3	4	66	15,9	0,68	0,42	3,50
D4-4	4	72	16,9	0,69	0,41	4,60
D8-1	8	52	13,5	0,65	0,42	2,50
D8-2	8	59	14,6	0,67	0,42	4,00
D8-3	8	66	15,9	0,68	0,42	4,35
D8-4	8	72	16,9	0,69	0,41	5,70
D15-1	15	51	13,4	0,65	0,41	5,90
D15-2	15	58	14,6	0,66	0,41	8,60
D15-3	15	61	15,1	0,67	0,41	10,70
D15-4	15	66	15,9	0,68	0,42	12,00
D20-1	20	51,5	13,4	0,65	0,42	6,00
D20-2	20	57	14,4	0,66	0,42	8,70
D20-3	20	61	15,1	0,67	0,41	11,45
D20-4	20	67,5	16,1	0,69	0,42	12,95



Şekil 5. Deney sonra oyulma çukurunun görünümü

Figure 5. View of the scour hole at the end of the experiment

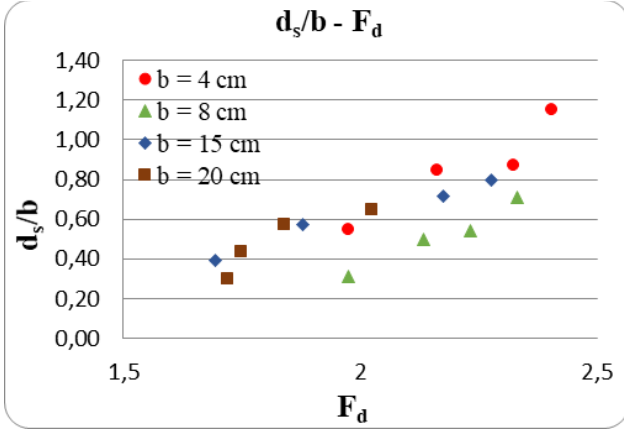


Şekil 6. Göreceli dane çapının oyulma derinliği üzerindeki etkisi

Figure 6. Effect of the relative grain size on scour depth

Şekil 7'de yoğunluk farkı esaslı dane Froude sayısının ( $F_d$ ) boyutsuz oyulma derinliğine olan etkisi verilmektedir. Grafikten de görüleceği gibi bu parametre arttıkça oyulma derinliği de artmaktadır. Bu eğilim tüm köprü ayak çapları için ortak bir özellik olarak görülmektedir.





Şekil 7. Yoğunluk farkı esaslı dane Froude sayısının oyulma derinliği üzerindeki etkisi  
Figure 7. Effect of the densimetric particle Froude number on scour depth

Şekil 8’de ölçülen oyulma derinlikleri ile mevcut bağıntılardan elde edilen oyulma derinlikleri karşılaştırılmıştır. Lai vd. (2009) ve Kothiyari vd. (2007)’nin verdiği bağıntıların, bu çalışmanın sonuçları ile en iyi mertebede uyumlu oldukları görülmektedir. Lai vd. (2009)’nin verdikleri bağıntıda, akım şiddeti ( $V/V_c$ ), yaklaşan akım derinliği etkisi ( $y/b$ ) ve göreceli tane çapının etkisini ( $b/d_{50}$ ) dikkate almışlardır. Kothiyari vd. (2007) ise yoğunluk esaslı dane Froude sayısını ( $F_d$ ) ve oyulma başlangıcı için yoğunluk farkı

esaslı dane Froude sayısını ( $F_{dB}$ ) göz önüne almışlardır.

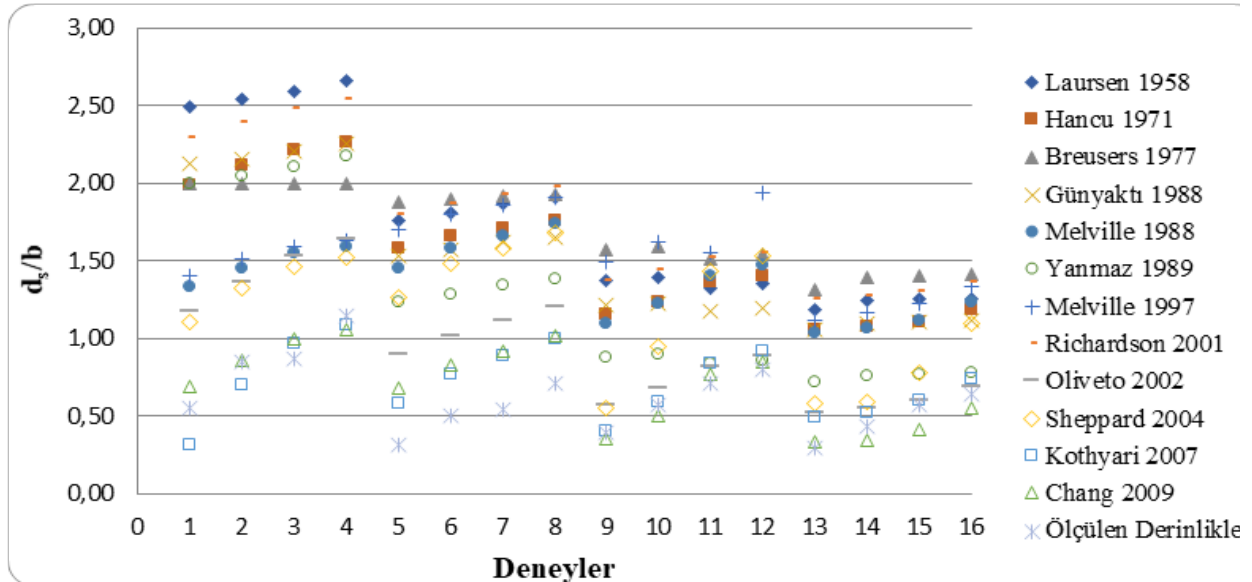
Bu çalışmadan elde edilen 16 veri noktası ve çeşitli araştırmacılardan elde edilen 152 veri noktası (Tablo 3) ile bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucunda 0,74 determinasyon katsayısı ( $R^2$ ) ve %20,34 saçılma indeksi (SI) ile bir denklem türetilmiştir:

$$\frac{d_s}{b} = 1,57 \left( \frac{y}{b} \right)^{0,261} \ln \left( \frac{b}{d_{50}} \right)^{0,204} \left( \frac{V}{V_c} - I_{vc} \right)^{0,704} \quad (20)$$

Tablo 3. Araştırmacılar ve regresyon analizinde kullanılan veri noktası sayıları

Table 3. Researchers and their data points used in the regression analyses

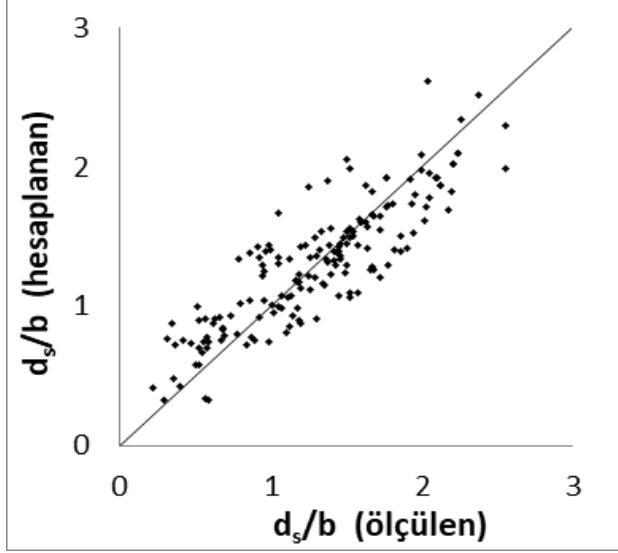
Araştırmacı	Veri Noktası
Dey vd. (1995)	18
Chang vd. (2004)	4
Melville ve Chiew (1999)	81
Mia ve Nago (2003)	5
Chabert ve Engeldinger (1956)	12
Yanmaz ve Altınbilek (1991)	2



Şekil 8. Ölçülen oyulma derinlikleri ve mevcut bağıntılarla karşılaştırılması

Figure 8. Comparison of the measured scour depths and those obtained from the present equations.

Oyulmanın başlaması için gerekli akım şiddeti değeri ( $I_{vc}$ ) 0,4 olarak göz önüne alınmıştır. Ölçülen boyutsuz oyulma derinlikleri ile denklem (20) ile hesaplanan boyutsuz oyulma derinlikleri Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Ölçülen ve hesaplanan boyutsuz oyulma derinliklerinin karşılaştırılması

Figure 9. Comparison of measured and calculated dimensionless scour depths

## Sonuçlar

Deneyle esnasında mevcut bilgilere ve önceki çalışmalara uyumlu olarak, en büyük oyulmanın köprü ayağının memba bölgesinde olduğu ve oyulma sırasında akımın kopardığı malzemenin taşınarak mansap bölgesinde yığıldığı gözlenmiştir. Akım şiddeti, yoğunluk farkı esaslı dane Froude sayısı ve ayak çapı arttıkça oyulma derinliğinin arttığı gözlenmiştir.

Lai vd. (2009) ve Kothari vd. (2007)'nin önerdiği bağıntıların bu çalışmanın sonuçları ile en iyi mertebede uyumlu oldukları görülmüştür. Yapılan regresyon analizi sonucu, köprü ayakları etrafında meydana gelen nihai temiz su oyulmasını tahmin etme amacıyla bir denklem türetilmiş, istatistiksel olarak anlamlı olan determinasyon katsayısı ( $R^2 = 0,74$ ) ve saçılma indeksi ( $SI = \%20,34$ ) elde edilmiştir

## Teşekkür

Yazarlar finansal destek için TÜBİTAK'a (proje numarası 109M637) teşekkür ederler.

## Kaynaklar

- [1] Breusers, H. N. C., Nicollet, G., Shen, H. W., (1977). Local scour around cylindrical piers, *Journal of Hydraulic Resources*, **15**, 3, 211-252.
- [2] Chang, W., Lai, J., Yen, C., (2004). Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**, 9, 905-913.
- [3] Chabert, J., Engeldinger, P., (1956). Etude des affouillements autour des piles de ponts, *Serie A. Laboratoire National d'Hydraulique*, 6, Quai Watier, Chatou, France.
- [4] Chiew, Y. M., (1984). Local Scour at Bridge Piers, *Doktora Tezi*, The University of Auckland, Auckland.
- [5] Dey, S., Bose, S., Sastry, G., (1995). Clear Water Scour at Circular Piers: a Model, *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**, 12, 869-876.
- [6] Ettema, R. E., (1980). Scour at bridge piers, *Rep. No. 236*, School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand.
- [7] Günyaktı, A., (1988). Köprü ayakları etrafında oyulma derinliğinin grafik yöntemle tayini, *Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi*, TÜBİTAK, **12**, 1, 96-108.
- [8] Hancu, S., (1971). Sur le calcul des affouillements locaux dans la zone des piles des ponts. *Proc., 14th /AHR Congr., Int. Assn. for Hydr. Res. (IAHR)*, Paris, France, 3, 299-313.
- [9] Kothari, U. C., Hager, W. H., Oliveto, G., (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, **133**, 11, 1229-1240.
- [10] Lai, J. S., Chang, W. Y., Yen, C. L., (2009). Maximum Local Scour Depth at Bridge Piers under Unsteady Flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **135**, 7, 609-614.
- [11] Laursen, E. M., (1958). Scour at bridge crossings, *Bull. No.8, Iowa Hwy. Res. Board*, Ames, Iowa.
- [12] Melville, B. W., (1975). Local scour at bridge sites, *Doktora Tezi*, The University of Auckland, Auckland.
- [13] Melville, B. W., Sutherland A.J., (1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, **114**, 10, 1210-1226.
- [14] Melville, B. W., (1997). Pier and abutment scour: integrated approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, **123**, 2, 125-136.
- [15] Melville, B., Chiew, Y., (1999). Time Scale for Local Scour at Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, **125**, 1, 59-65.

- [16] Mia, M., Nago, H. (2003). Design Method of Time-Dependent Local Scour at Circular Bridge Pier, *Journal of Hydraulic Engineering*, **129**, 6, 420–427.
- [17] Oliveto, G., Hager, W. H., (2002). Temporal evolution of clear-water pier and abutment scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, 9, 811–820.
- [18] Oliveto, G., Hager, W. H., (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, **131**, 2, 97–105.
- [19] Raudkivi, A. I., (1986). Functional trends of scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **112**, 1, 1-13.
- [20] Richardson, E.V., Davis, S.R., (2001). Evaluating scour at bridges (4th Edition), Teknik Rapor, Federal Highway Administration Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA NHI 01-001.
- [21] Sheppard, D. M., Odeh, M., Glasser, T., (2004). Large scale clear-water local pier scour experiments, *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**, 10, 957-963.
- [22] Yanmaz, A. M., (1989). Time dependent analysis of clear water scour around bridge piers, *Doktora tezi*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [23] Yanmaz, A., Altınbilek, H. (1991). Study of Time-Dependent Local Scour around Bridge Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, **117**, 10, 1247–1268.
- [24] Yanmaz, A.M., (2002). *Köprü Hidroliği*, Ankara: METU Press

## Experimental Investigation of Final Scour Depths Around Circular Bridge Piers Under Clear Water Conditions

### Extended Abstract

To date, numerous studies have been carried out by various researchers on clear water scour around bridge piers. The development of local scouring around the bridge piers is a complex process, and although there is much work on this topic, it is still of interest to researchers. In this experimental study, final clear water scour around circular bridge piers under steady flow was investigated. On the one hand experimental findings were interpreted among themselves taking into account the different experimental conditions, on the other hand the measured scour depths were compared with the scour depths obtained using the equations given in the literature.

Experiments were carried out in a flume 18.6 m long, 0.8 m wide and 0.75 m deep constructed in the Hydraulic Laboratory of Civil Engineering Department of Dokuz Eylul University within the scope of TÜBİTAK 109M637 project. Uniform bed material having 3.47 mm median diameter was used during the experiments. Circular piers with 4 cm, 8 cm, 15 cm and 20 cm diameters were tested under various steady discharges. Scour depths were measured by ultrasonic velocity profiler (UVP) device and flow depths were measured by ultrasonic level sensor (UltraLab ULS).

In accordance with the previous studies, it was observed that the highest scouring occurred in the upstream region of the bridge pier and the bed material that was eroded from scour hole was transported and stacked in the downstream region. It was also observed that scour depths increased with increase in flow intensity and densimetric particle Froude number. Relative grain diameter ( $b/d_{50}$ ) was found effective even after  $b/d_{50} > 25$ .

Measured scour depths compared with calculated scour depths from 11 different equations. Results are given in literature in Figure 1. Scour depths calculated from the equations of Lai et al. (2009) and Kothyari et al. (2007) were found best fit with those obtained from the experiments.

A regression analysis was performed with 16 data points obtained from this study and 152 data points obtained from various researchers. An equation was proposed in order to predict final scour depth for clear water under steady flow. Meaningful statistical parameters obtained by comparison of measured scour depths and those calculated from the proposed equation.

Keywords: Local scour, bridge pier, clear water, steady flow.

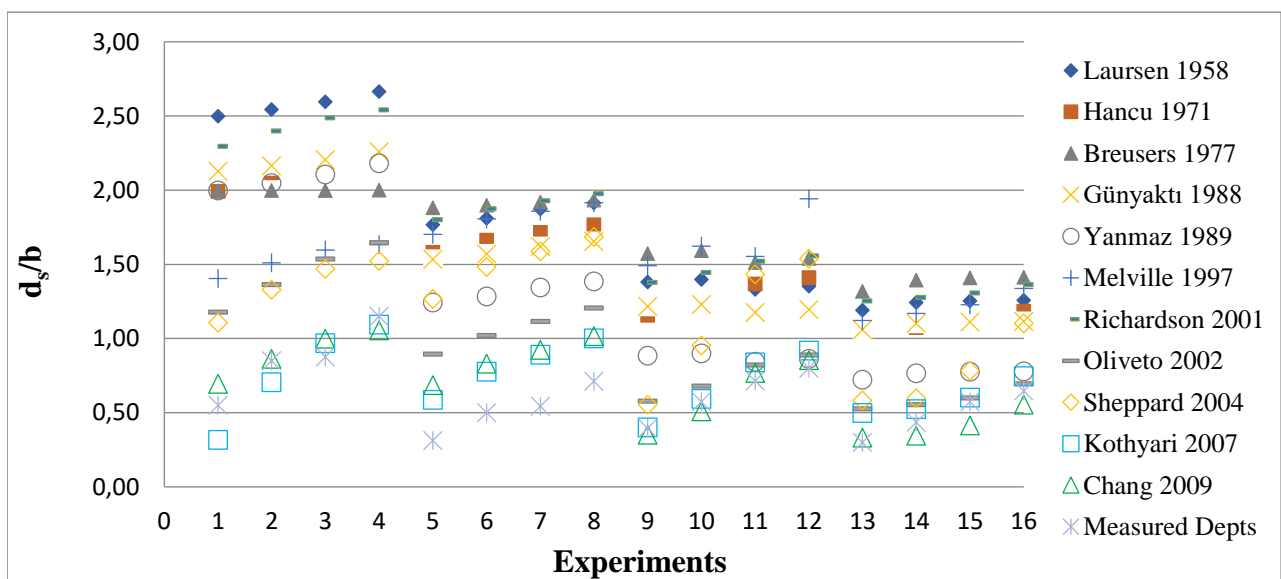


Figure 1. Measured scour depths and comparison with the present equations



# Kesme Etkin Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan Kafes Kiriş Analojisi ile Modellenmesi

**Sadık Can GİRGİN\***

Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir

[sadik.girgin@deu.edu.tr](mailto:sadik.girgin@deu.edu.tr) ORCID: 0000-0002-5224-3122, Tel: (232) 301 70 52

Geliş: 05.07.2019 , Revizyon: 11.09.2019 , Kabul Tarihi: 16.09.2019

## Öz

Betonarme elemanların çevrimsel ya da tek doğrultudaki yüklemeler altındaki davranışını yansıtabilecek sayısal modellerin oluşturulması, yapı mühendisliğinde güncelliğini korumaktadır. Depremler sırasında betonarme binalarda gözlenen hasarların kesme, kesme-eğilme etkileşimi gibi etkilere bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, kesme etkilerini doğrudan dikkate alabilen doğrusal olmayan kafes kiriş analojisi yaklaşımının, kesme etkin (kritik) betonarme elemanların sayısal modellenmesinde uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kafes kiriş modelinde doğrusal olmayan kafes elemanlar yatay ve düşey doğrultudaki beton ve donatı alanlarını; diyagonal doğrultuda ise sadece beton alanlarını tanımlamaktadır. Diyagonal çubuklarda betonun basınç dayanımına diğer doğrultuda gelişen çekme dayanımının etkileri de dikkate alınmaktadır. Ayrıca donatılı beton çubuklarda çekme güçlenmesi, donatı bulunmayan elemanlarda ise çekme dayanımı azalımı ilişkileri tanımlanmıştır. Kafes kiriş modelleri, farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş, kesme donatıları yetersiz plak şeridi testi ile kolon-kiriş birleşimi testlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Plak şeridi için oluşturulan sayısal modellerde eleman boyut etkisi ile diyagonal çubuğun yatayla yaptığı açı değişimi incelenmiştir. Enine donatısı bulunmayan kolon-kiriş birleşimi modelinde ise, birleşim için kafes kiriş modeli, diğer elemanlar için kesit hücresi (lif) yayılı plastisite modeli uygulanmıştır. Sayısal modelleri, deneysel çalışma ile karşılaştırıldığında, dayanım, başlangıç rijitliği ve dayanım azalması bakımından yeterli yaklaşıklıkla davranışı yansıttığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kafes kiriş analojisi; betonarme plak; kesme etkin; kolon-kiriş birleşimi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Betonarme yapı elemanlarının, deprem etkilerine bağlı çevrimsel yüklemeler ya da tek yönlü yükler etkisi altında doğrusal olmayan davranışlarının belirlenmesine yönelik deneysel ve analitik çalışmalar yapı mühendisliğinde güncelliğini korumaktadır. Deneysel çalışmalar ışığında yapısal elemanlarının ve sistemlerin değerlendirilmesinde uygulanacak analitik yöntemlerin, elemanlarda gelişecek kesme, eğilme, kesme-eğilme gibi hasar modlarını yansıtabilmesi gereklidir.

Ülkemizde, 1970 öncesi inşa edilen betonarme binaların kolon-kiriş elemanlarında ve birleşimlerinde enine donatıların bulunmaması, yetersiz beton dayanımı ve yetersiz sargılamanın bina performansını oldukça olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir (Bedirhanoglu v.d., 2010; Mısır, 2011; Mısır ve Kahraman, 2013; Şeker ve Bedirhanoglu, 2019). Deprem etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış betonarme elemanlarda ve birleşimlerde hasarların kesme veya eğilme-kesme etkileşimine bağlı olduğu önceki depremlerdeki saha gözlemlerinde belirlenmiştir. Eğilme-kesme etkileşimi, aksenal yük, eğilme ve kesme kuvvetlerinin birleşimi nedeniyle yapı elemanlarında gelişen doğrusal olmayan davranışı tanımlamaktadır (Panagiotou v.d., 2012).

Betonarme yapıların sayısal benzeştirilmesinde uygulanan modelleme yaklaşımları; yığılı plastisite, yayılı plastisite, sonlu eleman modelleri ve kafes sistem modelleri olmak üzere dört ana başlıkta toplanabilir. Yığılı plastisite modelleri kolon ve kiriş eleman uçlarında eğilme ve kesme yaylarının belirli bir çevrimsel kurala uygun tanımlanması ile oluşturulmaktadır (Lee ve Elnashai, 2001; Xu ve Zang, 2011). Yayılı plastisite yaklaşımı yalnızca eğilme etkilerini dikkate almakta ve betonarme kesitler tek aksenal beton ya da donatı çeliği malzeme modelleri ile tanımlanan kesit hücrelerine ya da liflere ayrılmaktadır. Mostafaei ve Vecchio (2008), ortalama aksenal birim şekil değişimleri ve beton

basınç birim şekil değişimlerini dikkate alarak tek yönlü yüklemeye altındaki betonarme elemanlar için tek aksenal kesme-eğilme modeli geliştirmiştir. Ceresa v.d. (2009) iki boyutlu Timoshenko lif esaslı kiriş-kolon elemanı önermiştir ve çevrimsel yüklemeye altındaki betonarme kolon-kiriş elemanları için eğilme-kesme modeli geliştirmiştir.

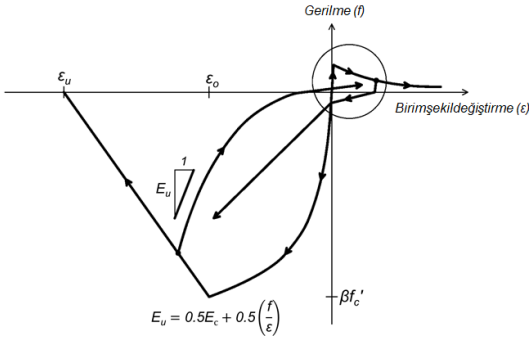
Kafes kiriş analogisi betonarme elemanlarda kesme etkilerinin modellenebilmesi amacı ile geliştirilmiştir. Kim ve Mander (1999) betonarme kolonların tek yönlü ve çevrimsel yüklemeye altındaki davranışları için kafes sistem modelini geliştirdi. Miki ve Niwa (2004) betonarme elemanların iki aksenal tepkileri için üç boyutlu bir kafes sistem modeli önermiştir. Bu modelde betonarme kolonlarda kesme dayanımı mekanizmasını temsil etmek için kolon üst kısmından alt ucuna kadar kemer elemanlar yer almaktadır. To v.d. (2009) monolitik iç kolon-kiriş birleşimlerinin kafes sistem modelleri ile çevrimsel yüklemeye etkileri altında analizlerini gerçekleştirmiştir. Betonarme perdelerin çevrimsel davranışının modellenmesinde Lu ve Panagiotou (2014) tarafından sonlu eleman boyut etkilerini dikkate alan bir kafes kiriş modeli geliştirilmiştir. Moharrami v.d. (2015) kesme etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış betonarme kolonlarda agrega kenetlenmesinin kesmeye katkısını dikkate alan kafes sistem modeli geliştirmiştir.

Doğrusal olmayan kafes kiriş analogisi ile modelleme yaklaşımı, deney verisine dayalı model parametreleri gerektirmediğinden, çalışma kapsamında kesme donatısı bulunmayan betonarme elemanların modellenmesinde uygulanmıştır. Kafes kiriş modelinde beton çubuklar diyagonal, yatay ve düşey doğrultularda yer almakta, donatı çubukları ise enine ve boyuna donatıları tanımlamaktadır. Diyagonal doğrultudaki beton çubuklarda asal gerilmelere bağlı basınç dayanımındaki azalma dikkate alınmaktadır. Çalışma kapsamında, bir betonarme plak şeridi ile kolon-kiriş birleşiminde enine donatısı bulunmayan numune

testlerinin sonuçları, oluşturulan sayısal modeller ile karşılaştırılmıştır.

## Kafes Kiriş Analojisi ve Malzeme Modelleri

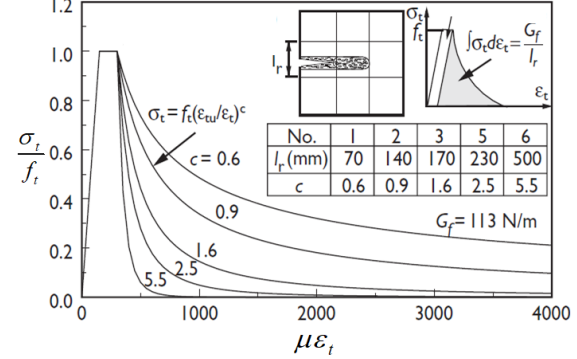
Sayısal model çalışmaları, yapı ve deprem mühendisliğinde kullanılan OpenSees sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellerde göz önüne alınan beton malzeme modeli (Lu ve Panagiotou, 2014) için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 1'de verilmektedir. Beton malzeme modeli, betonun basınç etkilerine dik yönde gelişen çekme birim deformasyonlarına bağlı azalım etkilerini göz önüne alabildiği için *Concretewbeta* olarak seçilmiştir. Sargısız beton basınç dayanımı ( $f_c'$ ),  $\epsilon_o = \%0,2$  birim deformasyonuna karşılık gelmektedir. Basınç bölgesinde ulaşılan basınç dayanımı sonrasında azalan kısımda  $\epsilon_u$  değeri Lu ve Panagiotou (2014) tarafından verilen yöntemle göre belirlenmiştir. Yatay ve düşeydeki beton kafes elemanlarının çekme dayanımı,  $f_t = 0.33\sqrt{f_c'}$  (MPa) olarak alınmıştır.



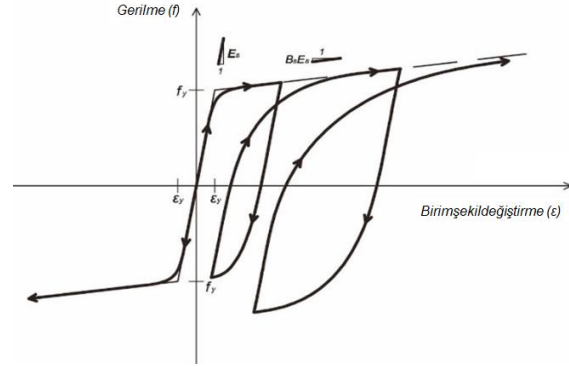
Şekil 1. Beton kafes çubuk elemanları için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Donatı çubuklarının paralelinde yer alan beton çubuklarda çekme dayanımına ulaştıktan sonraki azalma, Stevens (1991) tarafından verilen çekme güçlenmesi denkleminde göre belirlenmiştir. Modeldeki diğer yatay ve düşey kafes çubuklarda ise Maekawa v.d. (2003) tarafından farklı referans eleman uzunluklarındaki beton için önerilen çekme dayanımı azalması ilişkileri Şekil 2'de tanımlanmıştır. Donatı çeliği için

Giuffré-Menegotto-Pinto (GMP) malzeme modeli tanımlanmış olup, malzeme için gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 3'te verilmektedir. Donatı çeliği için *Steel02* dikkate alınmıştır.

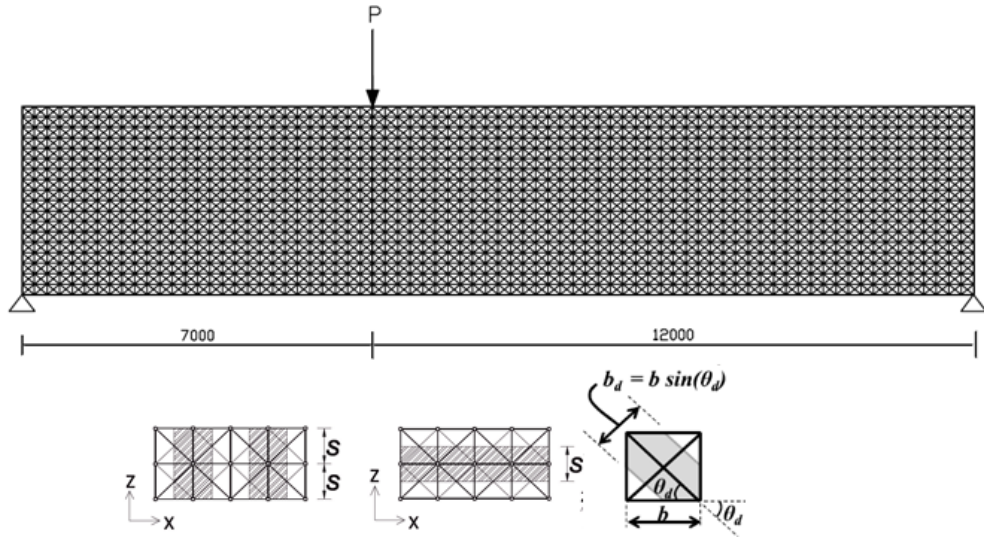


Şekil 2. Beton için çekme dayanımı azalım ilişkileri (Maekawa v.d., 2003)



Şekil 3. Donatı için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

Doğrusal olmayan kafes kiriş modelleme yaklaşımında beton ve donatı kafes çubukları yatay, düşey ve diyagonal doğrultularda tanımlanmaktadır. Donatı bulunan kafes çubuklara paralel tanımlanan beton çubuklarda ise çekme güçlenmesi etkileri, diğer beton çubuklarda ise çekme dayanımında azalma dikkate alınmaktadır. Diyagonal beton çubuklarda beton basınç dayanımının enine doğrultudaki çekme birim deformasyonlarına bağlı değişimi, Vecchio ve Collins (1986) çalışmasındaki deneysel gözlemlere göre dikkate alınmıştır. Diyagonal çubuklarda çekme dayanımı ise sıfır alınmıştır. (Moharrami v.d., 2015). Şekil 4'te betonarme plak şeridi için kafes kiriş modeli ile düşey, yatay ve diyagonal doğrultularda etki alanlarına göre belirlenen çubuk elemanlar yer almaktadır.



Şekil 4. Betonarme plak şeridi için kafes kiriş modeli ve düşey, yatay ve diyagonal doğrultulardaki çubuk elemanlar

Yatay ve düşey beton çubukların alanları, kesit genişliği,  $B$  ile düşey ya da yatay çubuk genişliklerinin ise sırasıyla,  $b_v$  ve  $b_h$  ile çarpımıdır. Diyagonal kafes çubukların enkesit alanı,  $A_d$ , yatay eleman boyutu,  $b$ , diyagonal eleman boyutu,  $b_d$  ve diyagonal eleman açısı  $\theta_d$  olmak üzere;

$$A_d = b_d B = b \sin \theta_d B \quad (1)$$

ile hesaplanmıştır.

## Plak Şeridi Testinin Modellenmesi

Yüksek yapıların temellerinde ya da baraj yapılarında kalın plaklar uygulanmakta olup bu plakların kesme dayanımının belirlenmesi amacıyla Collins v.d. (2015) tarafından deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deney numunesi için bir plaktan çıkarılan şeridin genişliği 25 cm, yüksekliği 4 m ve açıklığı 19 m'dir (Şekil 5). Test numunesinin sol mesnetten (W eksen) 7 m uzaklıktaki noktada (P eksen) tek yönlü (monotonik) yük etkisi altında yük-deformasyon ilişkileri elde edilmiştir. Plak şeridinde enine donatıların aralıkları 1.5 m olup, sadece kesme açıklığı,  $a/d$  3.12 olan tarafında yer almaktadır. Ortalama beton basınç dayanımı 40 MPa ve en

büyük agrega çapı 14 mm olup, kesitte üstte altta ise boyuna donatı yer almaktadır. Enine donatılar ise tek kollu olup 19.5 mm çaplı donatıdan oluşmakta, donatı çekme dayanımları ise eğilme donatısı için 573 MPa, enine donatı için 522 MPa'dır. Deneysel çalışmada düşey yönde artan yüklemeler 2-2 eksen boyunca uygulanmıştır. Test numunesi yükün sağ tarafındaki açıklıkta kesme nedeni ile göçme yüküne (685 kN) ulaşmıştır. Çalışmadaki sonuçlar, yönetmeliklerde (ACI 318-08) yer alan denklemlerin, minimum kesme donatısına bağlı artışı daha düşük değerlerde tahmin ettiği belirlenmiştir (Collins v.d., 2015). Çalışma kapsamında numunenin göçme anında ulaşacağı yük ve hasar modlarının tahmini için farklı ülkelerde endüstriden ve akademiden 66 ekibin katılımıyla dayanım tahmini yarışması düzenlenmiştir. Cervenka v.d. (2018) tarafından oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile hem yük bakımından hem de ulaşılan göçme modunun tahmini açısından en yakın sonuçları elde etmiştir.

## Eleman Boyut Etkisi

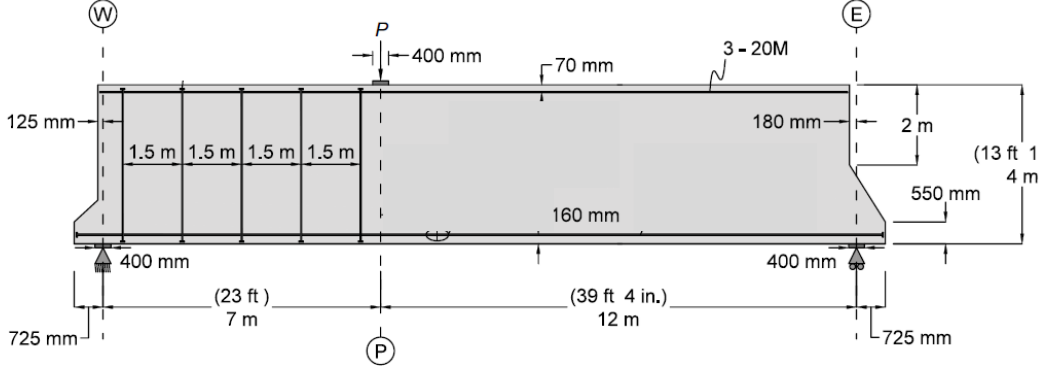
Kesme-eğilme etkileşimi hasar modlarına sahip betonarme perdelerin çevrimsel davranışının modellenmesi amacıyla gerçekleştirilen kafes kiriş modellerinde, kafes eleman boyutlarındaki artışın diyagonal elemanların kapasitelerine ulaşmasıyla geliştiği belirlenmiştir (Panagiotou



v.d., 2012). Bu çalışmada da kesme etkin elemanlarda eleman boyut etkisini inceleyebilmek için yatay ve düşey eleman boyutları, M1 modeli için 125 mm, 105 mm; M2 modeli için 333 mm, 290 mm olarak seçilmiştir. Modellerin yatayla yaptıkları açılar M1 için  $41^0$  ve M2 için  $40^0$ 'dir. Modellerdeki beton çubukların enkesit alanları Tablo 1'de verilmiştir.

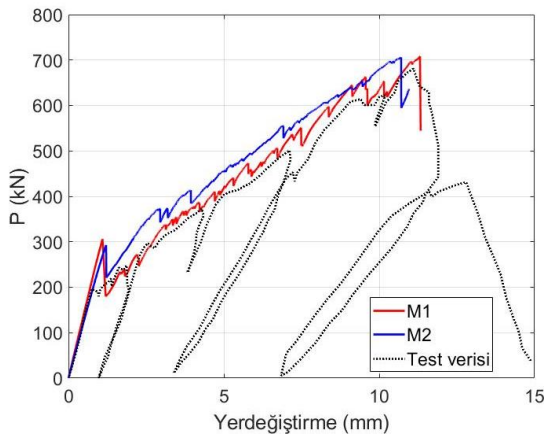
**Tablo 1.** Kafes kiriş modellerindeki beton çubuklar için enkesit alanları ( $\text{mm}^2$ )

Beton çubuk	M1	M2
DÜŞEY BETON ( $A_{CV}$ )	83332.5	31250
YATAY BETON ( $A_{CH}$ )	72500	26180.5
DIYAGONAL BETON ( $A_D$ )	54671	20068.5



Şekil 5. Plak şeridinin boyutları (Collins v.d., 2015)

M1 ve M2 modelleri ile hesaplanan düşey yük-yerdeğiştirme ile deneysel çalışmada belirlenen davranış Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre her iki modelde de başlangıç rijitliği deneysel çalışmadaki ile yakın değerde olup yükteki belirgin azalma 1.1 mm de gelişmiştir. Ulaşılan en büyük yük değerleri deneysel çalışma ile kıyaslandığında; M1 modeli ile yük değerinin 1.07 katı, M2 modeli ile 1.18 katı olarak hesaplandığı belirlenmiştir.

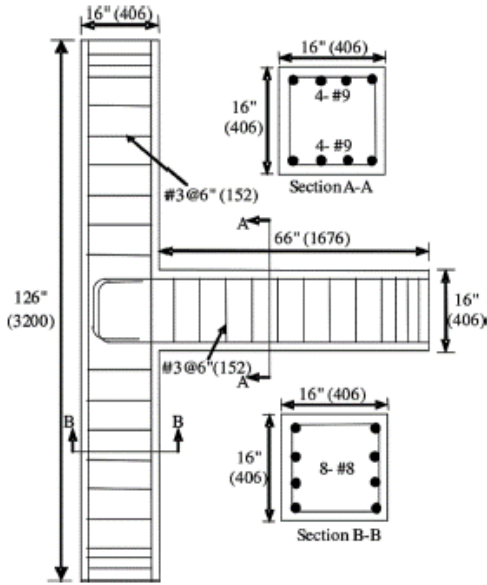


Şekil 6. Plak şeridi testi sonuçları ile sayısal modellerin karşılaştırılması

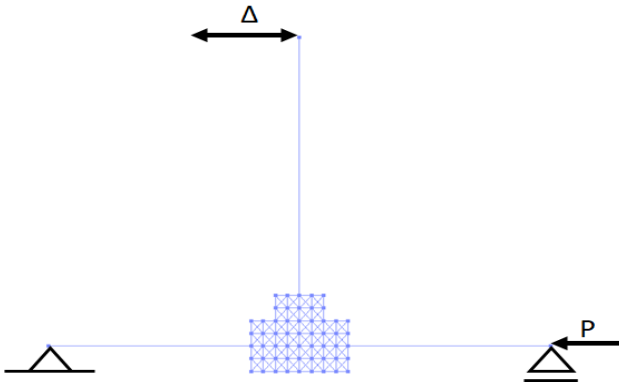
## Kolon-Kiriş Birleşimi Testinin Modellenmesi

Deprem etkilerine karşı yetersiz detaylandırılmış kolon-kiriş birleşimleri ile ilgili deneysel ve sayısal modelleme çalışmaları, mevcut bina değerlendirme çalışmaları açısından güncelliğini korumaktadır. Pantelides v.d. (2002) çalışmasında altı dış kolon-kiriş birleşimini farklı kiriş boyuna donatı oranı ve kolon eksenel yük oranlarına bağlı olarak tersinir tekrarlı yükler altında test etmiştir (Şekil 7). Çalışma kapsamında göz önüne alınan U4 numunesinin, test günündeki ortalama beton basınç dayanımı 31.6 MPa olup, 25 mm ve 29 mm çaplı donatıların akma dayanımları sırasıyla 469 MPa ve 458.5 MPa'dır. Kolon eksenel yük kapasitesinin %25'i değerindeki eksenel yük deney süresince uygulanmıştır. Deneyde boyuna donatıdaki ilk akma %0,5 ötelenme oranında, birleşimdeki belirgin çatlaklar ise % 1.5 ötelenme oranında gözlenmiştir. %5 ötelenme oranında birleşim panelinde kesme hasarları ve betonda dökülmeler meydana gelmiştir.

Kolon-kiriş birleşimi için oluşturulan sayısal modelde, hem doğrusal olmayan kafes kiriş modelleme yaklaşımı, hem de yayılı plastisite yaklaşımı esas alınmıştır (Şekil 8). Hibrit modelde birleşimde kafes kiriş modeli; birleşim bölgesi dışında bulunan kolon ve kiriş elemanlar için doğrusal olmayan kesit hücresi (lif) kolon-kiriş elemanı tanımlanmıştır. Kolon ve kirişlerin rijit elemanlarla kafes sisteme bağlantısı sağlanmıştır (Bowers, 2014).



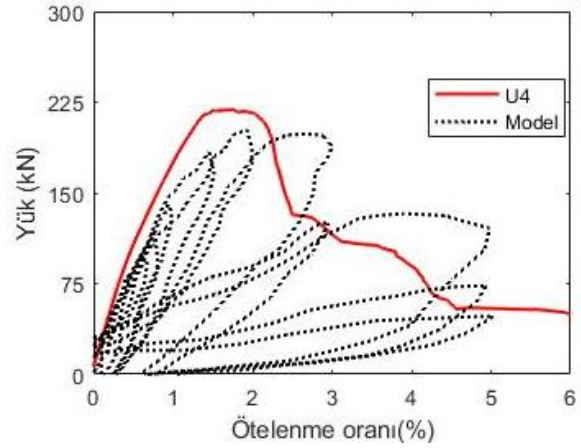
Şekil 7. U4 kolon-kiriş birleşimi numunesinin donatı detayları (Pantelides v.d., 2002)



Şekil 8. Kolon-kiriş birleşimi için oluşturulan hibrit sayısal model (Girgin, 2019)

Kolon- kiriş birleşimine kiriş ucundan tek yönlü (monotonik) olarak yükleme etiketlenen sayısal

model ile elde edilen yük- yerdeğiştirme grafikleri Şekil 9'da verilmiştir. Deneysel çalışmada ulaşılan en büyük yük değeri ile kıyaslandığında sayısal model ile yük değerinin 1.1 katı olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber başlangıç rijitliği ile dayanımın azaldığı yer değiştirmelerin yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Kolon-kiriş birleşimi testi sonuçları ile sayısal modellerin karşılaştırılması

## Kafes Kiriş Analojisinde Diyagonal Açı Değişiminin İncelenmesi

Kafes kiriş analojisinde model oluşturulurken enine veya boyuna donatıların konumları dikkate alınmaktadır. Diyagonal beton elemanların yatayla yaptıkları açının davranışa etkisi bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Diyagonal elemanların yatayla yaptıkları açıların en küçük değeri ACI 318 (2008)'e göre  $25^{\circ}$  alınmalıdır. Şekil 5' de verilen plak şeridi için sabit genişlik için (333 mm) diyagonal çubukların yatayla yaptıkları açılar  $35^{\circ}$ ,  $41^{\circ}$  ve  $46^{\circ}$  olarak alınmıştır. Tablo 2'de kafes kiriş modellerindeki beton çubukların enkesit alanları yer almaktadır.

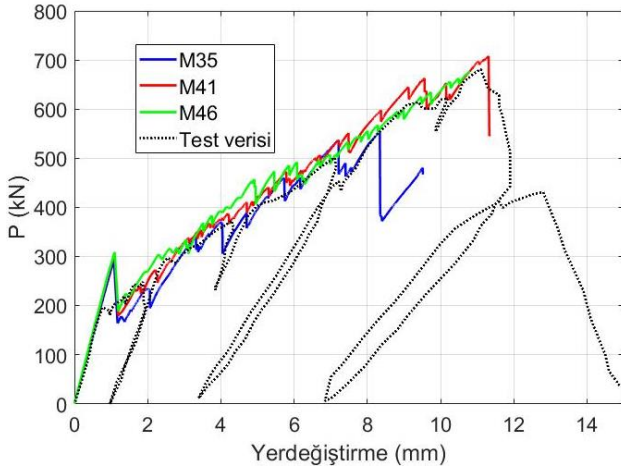
Sayısal modellerle hesaplanan yatay yük yer değiştirme değerleri ile deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar kıyaslandığında yük değerlerinin oldukça yakın değerlere sahip olduğu gözlemlenebilir (Şekil 10). Ancak her modeldeki yük düşmesinin belirgin olduğu andaki analitik hasar

şekillerinin oldukça farklı olduğu belirlenmiştir (Şekil 11).

**Tablo 2.** Kafes kiriş modellerindeki beton çubuklar için enkesit alanları (mm<sup>2</sup>)

Beton çubuk	M35	M41 (M1)	M46
DÜŞEY BETON (A <sub>cv</sub> )	83,332.5	83,332.5	83,332.5
YATAY BETON (A <sub>ch</sub> )	58,907.5	72,500	85,682.5
DİYAGONAL BETON (A <sub>D</sub> )	47,797.5	54,671	59,945

M35 modelinde 8.3 mm yerdeğiştirmede yatay beton çubukların çekmeye bağlı hasarlarının geliştiği; M46 modelinde yükün sol tarafında diyagonal çubuklarda hasarın geliştiği gözlenmiştir. M41 modelinde ise; deneysel çalışmanın sonunda yüklemenin sağ tarafında gözlenen hasar durumuna benzer hasarların geliştiği belirlenmiştir.



Şekil 10. Farklı diyagonal eleman açısına sahip modellerin yük-yerdeğiştirme grafikleri

## Sonuçlar

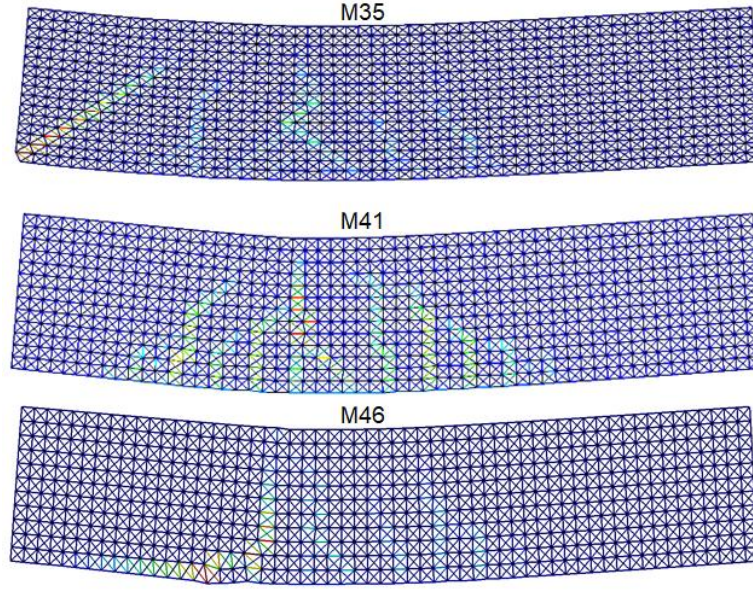
Bu çalışmada kesme etkilerine yetersiz detaylandırılmış betonarme elemanlar için Moharrami v.d. (2015) tarafından önerilen kafes kiriş analogisi, kesme donatısı bulunmayan betonarme elemanların davranışlarının incelenmesinde uygulanmıştır. Bu kapsamda mevcut modele ek olarak beton çekme dayanımı

azalım ilişkileri Maekawa (2003) yaklaşımı ile modellenmiştir. Çalışmada kesme etkin betonarme plak şeridi ve kolon-kiriş birleşimlerinin deney verilerinden yararlanılarak sayısal model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kafes kiriş modelinde, beton gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkilerinde boyut etkisi dikkate alınmaktadır. Çalışmada elde edilen bazı sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Betonarme plak şeridi için oluşturulan M1 ve M2 modellerinin deneysel çalışmada elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri ile karşılaştırıldığında yeterli yaklaşıklıkta oldukları belirlenmiştir.
- Diyagonal elemanın yatayla yaptığı açı değeri arttıkça diyagonal beton çubuklarda ezilmelerin erken yerdeğiştirme seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.
- Kolon-kiriş birleşimi sayısal modelinde, ulaşılan en büyük yük değerinin deneysel çalışmada ulaşılan yük değerinin yaklaşık 1.1 katına karşılık geldiği belirlenmiştir. Sayısal model, birleşim davranışını dayanım azalması bakımından yeterli yaklaşıklıkla yansıtmaktadır.

## Teşekkür

- Bu çalışmada plak şeridinin modellenmesi kapsamındaki sayısal modelleme çalışmaları, yazarın burslu olduğu TÜBİTAK 2219 yurtdışı burs programı kapsamında California Üniversitesi Berkeley'de gerçekleştirilmiştir. Yazar, değerli görüşleri ve önerileri için Dr. Marios Panagiotou'ya teşekkürlerini sunmaktadır.



Şekil 11. Farklı diyagonal eleman açısına sahip modellerin analitik hasar şekilleri

## Kaynaklar

- ACI Committee, & International Organization for Standardization. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- Bedirhanoglu, I., Ilki, A., Pujol, S. and Kumbasar, N. (2010). Behavior of deficient joints with plain bars and low-strength concrete, *ACI Structural Journal*, 107(3), 300-310.
- Bowers, J.T. (2014). Nonlinear cyclic truss model for beam-column joints of non-ductile RC frames. M.Sc. thesis, Virginia Polytechnic and State University.
- Ceresa, P., Petrini, L., Pinho, R., & Sousa, R. (2009). A fibre flexure–shear model for seismic analysis of RC-framed structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 38(5), 565-586.
- Cervenka, V., Cervenka, J., & Kadlec, L. (2018). Model uncertainties in numerical simulations of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*, 19(6), 2004-2016.
- Collins, M. P., Bentz, E. C., Quach, P. T., and Proestos, G. T. (2015). The challenge of predicting the shear strength of very thick slabs, *Concrete International*, 123(5), 624-633.
- Girgin, S. C. (2019). Effect of Modeling Beam-Column Joints on Performance Assessment of Columns in Non-Ductile RC Frames. *Teknik Dergi*, 31(6).
- Kim, J. H., and Mander, J. B. (1999). Truss modeling of reinforced concrete shear – flexure behaviour, MCEER Report 99-0005, University at Buffalo, State University of New York.
- Lee, D. H., and Elnashai, A. S. (2001). Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction, *Journal of Structural Engineering*, 127(5), 546:553.
- Lu, Y. and Panagiotou, M. (2014). Three-dimensional cyclic beam-truss model for non-planar reinforced concrete walls, *Journal of Structural Engineering*, 140(3).
- Maekawa, K., Pimanmas, A., and Okamura H. (2003). Nonlinear mechanics of reinforced concrete. New York, NY: Spon Press. 721 pp.
- Miki, T., and Niwa, J. (2004). Nonlinear analysis of RC structural members using 3D lattice model, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 343-358.
- Mısır, İ. S. (2011). Betonarme yapıların deprem davranışının iyileştirilmesinde çimento şerbeti emdirilmiş lifli beton (SIFCON) kullanımı (Doktora tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Misir, I. S., & Kahraman, S., (2013). Strengthening of non-seismically detailed reinforced concrete beam–column joints using SIFCON blocks, *Sadhana*, 38(1), 69-88.
- Moharrami M., Koutromanos I., Panagiotou M., Girgin S.C. (2015). Analysis of shear-dominated RC columns using the nonlinear truss analogy, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 44(5), 677-694.

- Mostafaei, H., and Vecchio, F. J. (2008). Uniaxial shear-flexure model for reinforced concrete elements, *Journal of Structural Engineering*, 134(9), 1538-1547.
- Panagiotou, M., Restrepo, J. I., Schoettler, M., and Kim, G., (2012). Nonlinear cyclic truss model for reinforced concrete walls, *ACI Structural Journal*, 109(2), 205-214.
- Pantelides, C.P., Hansen, J., Nadauld, J. and Reaveley, L.D., Assessment of reinforced concrete building exterior joints with substandard details. PEER report, 2002.
- Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., Collins, M. P., and Will, T. G. (1991). Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis, *ACI Structural Journal*, 99 (10), 2109-2122.
- Şeker, M., & Bedirhaoğlu, İ. (2019). Düşük dayanımlı betona sahip betonarme kısa kolonların kesme etkileri altında davranışlarının incelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(1), 385-395.
- To, N., Sritharan, S., and Ingham, J. (2009). Strut-and-tie nonlinear cyclic analysis of concrete frames. *Journal of Structural Engineering*., 135:10(1259), 1259-1268.
- Vecchio, F. G. and Collins, M.P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *Journal of the American Concrete Institute*, 83(2), 219-231.
- Xu,S., and Zhang, J. (2011). Hysteretic shear-flexure interaction model of reinforced concrete columns for seismic response assessment of bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40:315-337.

## Modeling of Shear-Critical Reinforced Concrete Elements with Nonlinear Truss Analogy

### Extended abstract

Experimental and analytical studies to determine the nonlinear behavior of reinforced concrete structural elements under the effect of cyclic loads or unidirectional loads are still a challenging subject in structural engineering. Analytical prediction of the response of a structural element is one of the essential components in structural engineering. Modeling approaches for simulating inelastic behavior structural elements can be classified as lumped plasticity, distributed plasticity and nonlinear truss modeling approaches.

Truss or strut-and-tie models have been proposed in the literature to investigate the strength and stiffness characteristics of RC members during cyclic reversals. Nonlinear concrete trusses are used in the diagonals, accounting for the biaxial effect on the compression behavior. Tension stiffening and softening effects are modeled for all concrete truss elements, accounting for mesh size effects and fracture energy. The concrete material model used for the diagonal truss elements accounts for the bi-axial strain field on the concrete compressive behavior. Both the uniaxial and bi-axial concrete models as well as the four-node truss element used in the diagonals.

This study presents computational modeling of shear-critical reinforced concrete components. For this purpose, nonlinear truss modeling approach was validated by comparing experimental data of a slab strip specimen and a beam-column joint with non-seismic details. The computer program OpenSees was used for all the case studies in this paper.

Thick slabs are applied on the foundations of high-rise structures or dam structures. Collins et al. (2015) tested a slab strip specimen as a part of research on shear strength of thick one-way slabs. The slab strip specimen had 25 cm thickness, 4 m height and 19 m span. The specimen was pinned at west and roller-supported at east directions. During the experimental study, the load was applied monotonically with a hydraulic jack along 7 m from the west support. The specimen failed in shear in the east shear span when the applied load reached 685 kN. The west side of the

specimen showed no indication of being close to failure while containing significant diagonal cracks.

M1 model with  $41^\circ$  and M2 model with  $40^\circ$  angles of diagonals in respect to the horizontals ( $\theta_a$ ) were developed, for the slab strip specimen with different element lengths. Tension softening behaviors of horizontal and vertical concrete truss elements are adjusted due to element lengths for models. The lateral force – lateral displacement responses for experimentally measured and monotonically computed using M1 and M2 models are compared. Both models computed initial stiffness in a good agreement with the experimental data. Computed loads for the models at 4 mm displacement were 1.07 times and 1.18 times the experimentally measured response for M1 and M2 models, respectively.

Pantelides et al. (2002) tested six exterior full-scale beam-column joints without shear reinforcement and non-seismic details. During the test of Unit-4 specimen, first yield in longitudinal reinforcement was observed and initial significant cracking in the joint was observed at at 0.5% and 1.5% drift ratios, respectively. Hybrid numerical model is considered for beam-column joints of non-ductile frames including nonlinear cyclic truss model for connection region and distributed plasticity model for beams and columns. The lateral force– displacement responses for measured and monotonically and cyclically computed using numerical simulation model are compared. The peak strength in numerical model is 1.2 times the experimentally measured.

Besides, the effects of angle of diagonal truss elements are investigated with respect to slab trip specimen tests. M35 model showed significant strength degradation at 8.3 mm displacement due to crushing of horizontals near the west support of the beam. M41 model showed a good agreement with experimental results in terms of strength degradation and load-displacement. M46 model had failures due to crushing of diagonals at the west side of the beam unlike the observed failures in the test.

**Keywords:** nonlinear truss analogy; reinforced concrete slab; shear-critical; beam-column joint

## The Effect of Soil Type and Different In-situ Test Results on Soil Amplification Analysis

Murat TÜRKÖZ<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Eskisehir Osmangazi University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Eskisehir, Turkey, ORCID ID 0000-0003-0241-113X

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 9 July 2019  
Received in revised form 3  
September 2019  
Accepted 5 September 2019  
Available online

#### Keywords:

Multi-Channel Analysis of Surface  
Waves, Standard Penetration Test,  
Local Site Condition, Soil  
Amplification

### ABSTRACT

The effect of local soil conditions is taken into consideration in the evaluation of ground motion properties in seismic design of structures. One of the most important effects on the ground surface due to strong ground motion is soil amplification resulted in the structural damage. Soil amplification can be determined both by dynamic analyses performed according to analytical methods based on local site conditions and obtained with investigations based on the results of in-situ testing methods. Therefore, the effects of local site conditions are considered to evaluate the properties of ground motion for seismic design of structure. In this study, soil properties of İnönü district are evaluated based on Standard Penetration Test (SPT) and Multi-Channel Analysis of Surface Wave (MASW) method which is one of the geophysical methods. İnönü is located at the west of Eskişehir surrounded with numerous active fault systems and subjected to very intensive tectonic activities in geological history. The studies related to seismic activity have been made on the basis of probabilistic seismic hazard analyses. Soil amplification analyses are performed with Shake2000 software comparatively by taking into considerations data from in-situ testing methods.

Doi: 10.24012/dumf.589196

### Introduction

The aim of planning the settlements is to increase the quality of life and welfare of the society [1]. To this end, planning requires an interdisciplinary approach to meeting different human needs [2]. However, geological and geotechnical studies constitute an important stage in the protection and control of possible natural disasters [3]. As a result, earthquake, which is one of the most important natural disasters, creates a dynamic movement effect on buildings by creating a displacement movement depending on time.

Therefore, in predicting the behavior of the structures to be constructed and constructed under earthquake loads, it is necessary to know how the foundation system and the foundation soil will act under earthquake loads in the regions where earthquake is likely to occur. The major damages in the 1964 Nigata and Great Alaska earthquakes have demonstrated the importance of soil behavior during the earthquake. In the earthquake of Adapazarı on August 17, 1999; it is stated that the main cause of damages in Adapazarı, Gölcük and Yalova is due to soil problems [4, 5, and 6].

\* Corresponding author  
Murat TÜRKÖZ  
✉ [mturkoz@ogu.edu.tr](mailto:mturkoz@ogu.edu.tr)

Damages caused by past earthquakes indicate that local soil conditions in a region have a major impact on the earthquake impact [7, 8, and 9]. Therefore, the effect of local soil conditions is taken into consideration in the evaluation of ground motion properties in seismic design of important structures.

The estimation of the ground motion created by the energy arising in the crust region of the earth can be made by interpreting the information that is developed in different disciplines such as geotechnical and structural engineering, seismology, geophysics and geology. Although the relevant information has a very rapid upward trend, there are still some uncertainties.

There is a significant effect of the soil response to repeated loads on the distribution and character of damages caused by earthquakes. In other words, only low level unit deformations occur on the ground in many cases and especially in cases where wave propagation effects are dominant and large unit deformations occur when the stabilization of the soil mass is evaluated. In this sense, different methods have been developed to measure and evaluate the soil behavior under low and high unit deformation under repeated loads [10].

Various laboratory and field methods are used to measure dynamic soil properties. Standard Penetration Test (SPT) method is widely preferred in field applications but geophysical methods are used in very special projects due to application costs and difficulties. On the other hand, multi-channel analysis of surface waves (MASW), which is cheaper and more functional compared to other geophysical methods, has been increasingly used in geotechnical engineering applications [11, 12].

It has long been known that earthquake damage is generally greater on soft sediments than on bedrock. Many settlements including Eskişehir-İnönü district were formed along river beds on such newly deposited soft and young surface deposits. Therefore, in the seismic design of buildings or other structures, the effect of local soil properties is taken into consideration in the evaluation of ground motion properties.

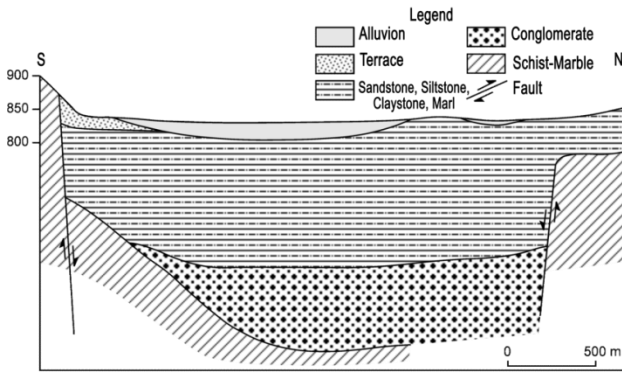
In this study, it is aimed to determine the dynamic soil properties of the region, which also includes the settlement area of İnönü district, located in the west of Eskişehir, under the influence of nearby sources, and to investigate its behavior under earthquake conditions. Within the scope of the study, the geological structure of the region has been evaluated by examining the lithological and stratigraphic characteristics of the region, and experiments have been conducted on the basis of SPT and MASW method which is one of the geophysical methods. Experimental studies were carried out to determine the physical and engineering properties of the samples in the laboratory. The studies related to seismic activity have been made on the basis of probabilistic seismic hazard analyzes considering the source zones affecting the region and the maximum ground acceleration values have been reached for different earthquake conditions. Afterwards, dynamic analyses were carried out using two different in-situ test results (SPT and MASW) using SHAKE2000 [13] package program.

## Materials and Methods

### *Soil Profiles*

In this context, geological structure of the study area was evaluated first. State Hydraulic Works (DSİ) [14], by the purpose of revealing the hydrogeological characteristics of the region (Eskişehir-İnönü) made electrical resistivity measurement. The cross-sectional line taken near the study area is given in Figure 1. Resistivity data indicate the presence of faults that limit the study area from north and south, as well as buried faults. There are valleys hanging along the southern edge of the İnönü-Dodurga segment. Existing earthquake records, geophysical data and the presence of hanging valleys on the Eskişehir fault zone indicate that the İnönü-Dodurga segment is active and plays an important role in the development of current morphology [15].





**Figure 1.** Electrical resistivity measurement from the study area [14]

Paleozoic schists and marbles, Neogene limestone and Quaternary alluvium are observed in the study area (Figure 1). Alluvium is observed in the east-west direction along the İnönü plain. This unit, which has a thickness of 20-30 m, consists of clay and silt at the upper levels and consists of sand and gravel at deeper levels. Field studies carried out within the scope of this study were conducted in two stages. The first stage field study was carried out on the basis of Standard Penetration Test (SPT), which is also considered as high deformation test. SPT was performed every 1.5 m to a depth of 30.5 m and undisturbed (UD) soil samples were provided at depths suitable for sampling. In the second stage of the study, geophysical field test (MASW), which are defined as low deformation tests, were carried out considering the relevant drilling locations. Intensive experimental studies were carried out in order to identify alluvial soil units in the study area.

MASW is a geophysical method, which generates a shear wave velocity,  $V_s$ , profile by analyzing Raleigh-type surface waves on a multichannel record. A MASW system consisting of a 24 channels Geotech model, Lakkolit 24M-3 seismograph with 24 geophones of 4.5 Hz frequency were used in this investigation. The recording sampling interval of 1.0 ms and the recording length of 2048 ms were applied. The recorded Rayleigh wave is analyzed using SurfSeis software. SurfSeis is designed to obtain  $V_s$  data using a three-step procedure. These steps are: i) preparation of a multichannel recording, ii) distribution curve analysis and iii) inversion. More detailed

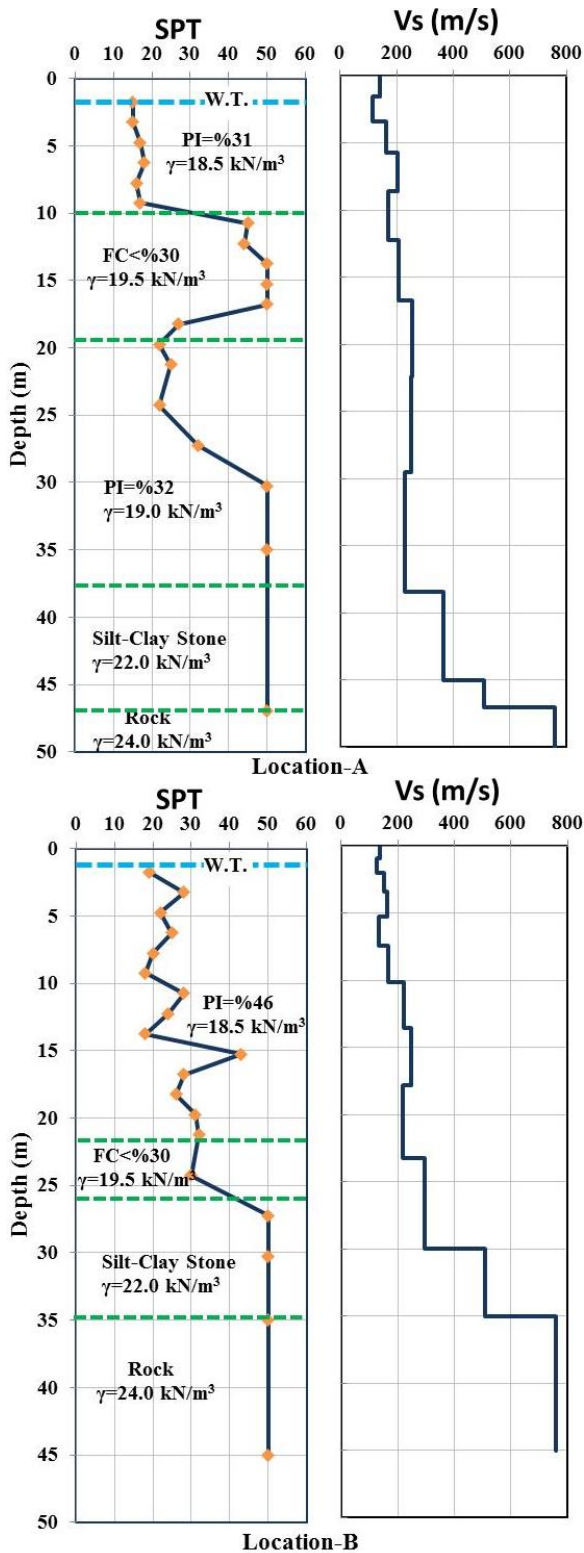
information on the MASW method and its applications is available in the literature [16, 17].

A large part of the study area is covered with fine grained material at the top and coarse grained material at the bottom as defined Alluvium. The soil profiles, SPT numbers and shear wave velocity ( $V_s$ ) profiles of the two selected locations are presented in Figure 2.

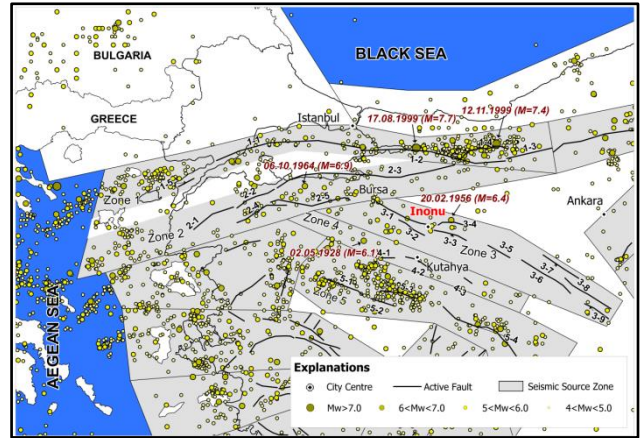
### *Site Specific Seismic Hazard Analysis*

Seismic-tectonic map proposed by Seyrek [18] was taken as a basis for the seismic hazard analyses to be performed for the study area and its surroundings. Seismic source zones within the boundary of 100 km radius of the study area, which is the center of İnönü district, were determined to be under the influence of 5 different seismic source zones (Figure 3). Within the scope of this study, the northern branch of the North Anatolian Fault Zone is shown as Zone 1 and the southern branch as Zone 2. The other source zone controlling the seismic hazard in the study area is defined as Zone 3. It is stated that this fault zone called İnönü-Eskişehir fault zone extends between İnegöl and Tuz Gölü and consists of successive segments [19, 20]. The Kutahya Fault Zone is situated in the Southwest of Inonu. Simav fault zone is evaluated as Zone 5.

In this study, the resource zones considered during the seismic hazard analysis and each segment were evaluated separately. In the determination of maximum earthquake magnitude, which is one of the most important stages of seismic hazard analysis, the relationship between surface fracture ( $L$ ) and earthquake magnitude ( $M_w$ ) proposed by Wells and Coppersmith [21] was used.



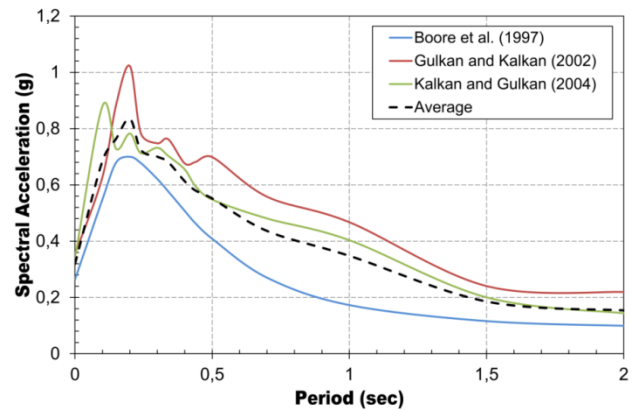
**Figure 2.** Representative soil profiles, SPT numbers and shear wave velocity ( $V_s$ ) profiles for two selected locations.



**Figure 3.** Distribution of source zones and earthquakes affecting the study site and its surroundings.

**Table 1.** Probabilistic seismic hazard analysis results for the study area.

Attenuation relationship	PGA (g)
Boore et al., [22]	0.26
Gulkan and Kalkan, [23]	0.35
Kalkan and Gulkan, [24]	0.34
Mean	0.32



**Figure 4.** Average response spectrum in the rock for the study area ( $V_{s,30} = 760 \text{ m/s}$ )

In the absence of strong ground motion recordings in and around the project site, multiple attenuation relationships are required to estimate the ground motion parameters to be created by the design earthquake. In this study, three different attenuation equations were used [22, 23, and 24].

**Table 2.** List of earthquake records used in this study

EARTHQUAKE	DATE	STATION	COMPONENT	MAGNITUDE	CLOSEST DISTANCE (km)	PGA (g)	
ERZINCAN	<b>ERZ92</b>	92/03/13	Erzincan	E-W	$M_L=6.1$	16.8	0.480
DUZCE	<b>DUZ99</b>	99/11/12	Duzce	N-S	$M_w=7.2$	9.7	0.416
KOCAELI	<b>KOC99</b>	99/08/17	Duzce	E-W	$M_w=7.4$	46.1	0.321
LOMA PRIETA	<b>LOP89</b>	89/10/18	Gilroy Array #3	E-W	$M_w=6.9$	12.8	0.367

The most important criterion in the selection of the attenuation relationships is that they are compatible with the existing tectonic structure. Probabilistic seismic hazard analysis was performed for the study area using the software developed by Seyrek [18]. It should be noted that the hazard analyses are performed for rock environment ( $V_{s,30} = 760$  m/s). Table 1 presents the results of the ground motion level, expressed as the design earthquake, corresponding to the probability of exceeding 10% in 50 years. When Table 1 is examined, it is understood that the maximum ground acceleration (PGA) value for the rock environment in İnönü city center is 0.32 g. Figure 4 shows the average response spectrum on the rock level obtained using the estimation equations developed by Boore et al. [22], Gülkan and Kalkan [23] and Kalkan and Gülkan [24]. In engineering applications, the response spectrum is a parameter required for the design of structures that reflects the dynamic properties of the soil during an earthquake.

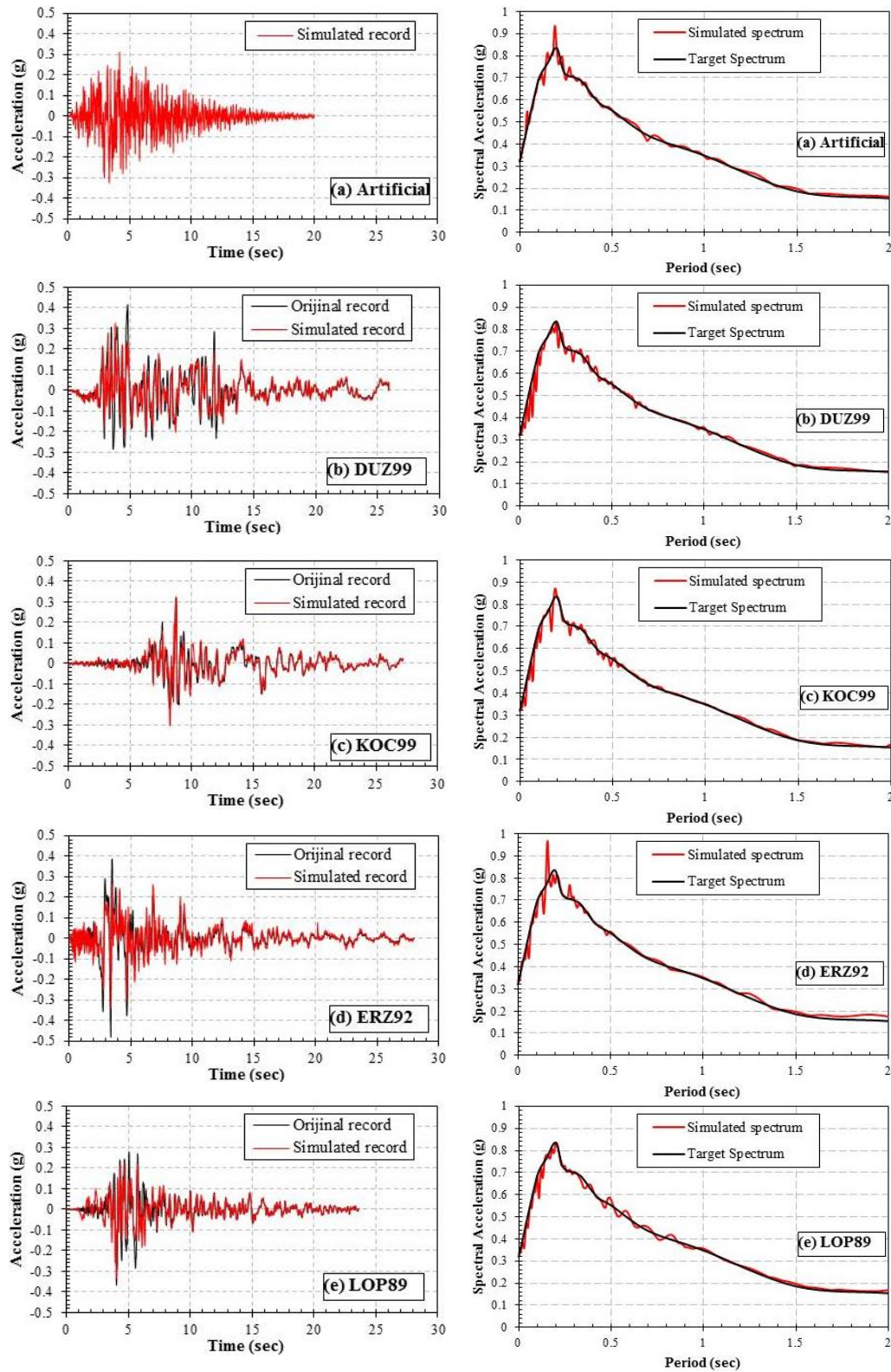
In seismic design specifications, since the seismic hazard in a field is defined by the design acceleration spectrum, it is necessary to use acceleration records compatible with the design acceleration spectrum in linear elastic or non-elastic earthquake calculations in the time domain of structures. Acceleration records can be obtained from synthetic (simulated), simulated or real earthquake recordings. Although it is preferred to use real ground motion records, there are difficulties in finding strong ground motion data banks that are compatible with seismic source and local ground conditions and source-field distance

affecting the project site [25]. For this reason, both synthetic records can be produced and real earthquake records can be selected to meet the conditions specified in the regulations and scaled to match the design acceleration spectrum. Acceleration-time graph is used which is compatible with the hazard spectrum in soil amplification analysis.

For this purpose, four different real earthquake records are selected as seen in Table 2. The abbreviations given in Table 2 will be used in this way for soil amplification analyses. The selected earthquake records were scaled in the time domain to be consistent with the average acceleration spectrum given in Figure 4. For this purpose, SeismoMatch software was utilized using the wavelets algorithm proposed by Abrahamson [26] and Hancock et al. [27]. In addition, an artificial acceleration recording compatible with the response spectrum was created using SeismoArtif software. Figure 5 shows the scaled and non-scaled states of real and artificial acceleration recordings that are harmonized with the average response spectrum. As seen in Table 3, for the material parameters used in the analyses, Vucetic and Dobry [28], considering the plasticity index of clayey soils, and Seed et al. [29], for alluvial and the sanded soil, relations were used.

## Results and Discussion

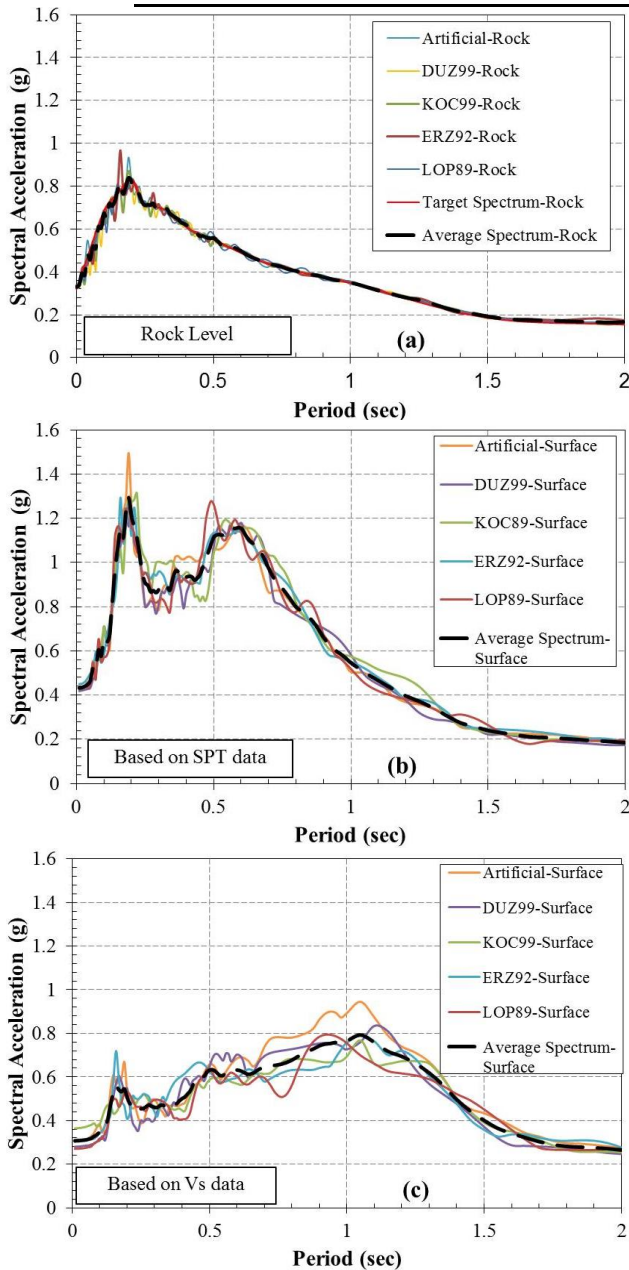
The most reliable way to obtain the soil amplification is the result of spectral analysis of the accelerations recorded during strong ground motions [30].



**Figure 5.** Scaled and non-scaled states of real and artificial acceleration recordings that are harmonized with the average response spectrum

**Table 3.** Material parameters used in analyses

	Soil	Soil classification	Dynamic behavior model
Alluvial	High plasticity clay and silt	CH, MH	Based on Plasticity Index, Vucetic and Dobry [28]
	Low plasticity clay and silt	CL, ML	Based on Plasticity Index, Vucetic and Dobry [28]
	Clay silty sand (gravel)	SM, SC, GC, GM	Fine content <30%, Seed et al. [29] Fine content >30%, depending on PI, Vucetic and Dobry [28]
Neogene	Sandstone	-	EPRI Rock 2 [13]
	Silt-Clay stone	-	EPRI Rock 2 [13]

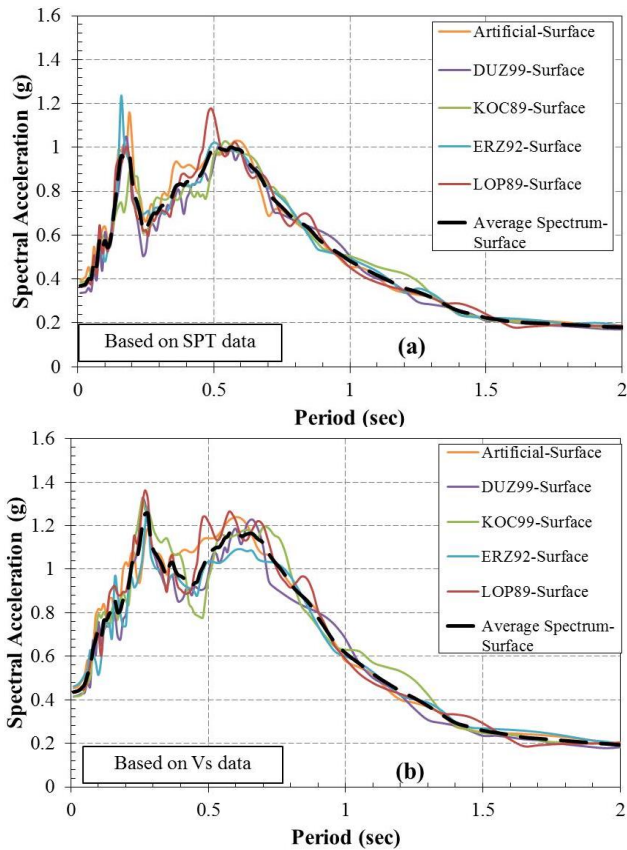


**Figure 6.** Variation of the spectral values of the acceleration-time recordings obtained on the soil surface using SPT and Vs data at location-A (5% damping)

The spectral values of the acceleration-time recordings obtained on both the rock and the soil surface for the relevant locations selected within the scope of the study were obtained using SPT and MASW test results under different earthquake conditions.

The variation of spectral accelerations obtained for the location-A is presented in Figure 6 as a result of analyses on rock level and soil surface. As can be seen from Figure 2, there is a 10m thick sand layer between the two clay layers under groundwater in the location-A profile. Comparing Figures 6b and 6c, the spectral acceleration values obtained using SPT data yielded greater acceleration values at a lower period than those obtained using Vs. When the spectral acceleration obtained as a result of the analysis using Vs data in Figure 6c is observed, it is seen that there is no change in acceleration magnitude compared to the rock level but the greater period value is effective. In addition, in this study in which earthquake recordings with different frequency contents are used as input, the scattering of spectral accelerations on the soil surface in SPT basis is in a narrower range than the spectral accelerations on ground surface in Vs basis. In other words, the scattering of spectral accelerations on the ground surface was found in a wider range as a result of the analyses using Vs data.

Figure 7 shows the variation of the spectral acceleration obtained as a result of the analyses for location-B. In the representative soil profile of the location-B, a sand layer of approximately 4 m thickness was observed under the 22 m thick clay layer (Figure 2).



**Figure 7.** Variation of the spectral values of the acceleration-time recordings obtained on the soil surface using SPT and Vs data at location-B (5% damping)

less than the location-A. Due to the decrease in the thickness of the sand layer in the soil profile defined in Location-B, the spectral accelerations on soil surface found as a result of the analysis based on Vs data were greater than those found using SPT data. In other words, higher spectral acceleration values were obtained as a result of the analysis using Vs data in this profile (Location-B) dominated by clay soil layer. Spectral values between 0.2 sec and 1 sec (short period and long period, respectively) are very important in determining the design spectrum which plays an important role in the earthquake behavior of the structures.

For this reason, spectral acceleration values corresponding to these periods are mapped in the seismic hazard maps produced for different regions and presented to the use of relevant experts.

The evaluation of the analysis results as a whole is presented in Table 4. The average of the spectral accelerations values on soil surface presented in Figure 6 and 7 was reached by taking the average of the values between 0.2 sec and 1 sec period.

The thickness of the sand layer observed in the representative soil profile of the location-B is

**Table 4.** Comparison of soil amplification analysis results

Location	Earthquake	Spectral Acceleration on Soil Surface (g)			
		Based on SPT Data		Based on Vs Data	
		Mean	Max.	Mean	Max.
A	Artificial	0.930	1.495	0.615	0.900
	DUZ99	0.917	1.247	0.596	0.757
	KOC99	0.960	1.312	0.563	0.694
	ERZ92	0.942	1.293	0.586	0.757
	LOP89	0.943	1.278	0.560	0.794
B	Artificial	0.809	1.160	1.038	1.234
	DUZ99	0.761	1.047	0.975	1.326
	KOC99	0.783	1.028	1.016	1.322
	ERZ92	0.786	1.235	0.956	1.284
	LOP89	0.799	1.178	1.039	1.363

When the effects of soil conditions on the results are examined, the acceleration values obtained at the location-A where the sand layer thickness is higher are higher than the results at the location-B where the sand layer thickness is less. When the different earthquake records are examined separately, similar results are obtained and the dominant effect of the earthquake records on the results can be seen in Table 4.

## Conclusions

When the average spectral acceleration values obtained on the surface of the soil were compared, in the analyses made on the basis of Vs data obtained from MASW method, large average spectral acceleration values were calculated on the soil profiles composed of clay and weathered rocks under the this clay layer. In the analyses made using SPT data, generally large average spectral acceleration values were calculated in profiles consisting of approximately 10 m thick clay on the surface, 10 m thick sand below and a clay layer below this layer. In other words, large average spectral acceleration values were calculated in the analyses using the SPT test results at the locations where the sand layers are dominant and using the MASW test results at the locations where the clay layers are dominant.

The fact that the groundwater level in the study area is quite high is thought to be effective on the results.

In addition, in this study in which earthquake recordings with different frequency contents are used as input, the scattering of spectral accelerations on the soil surface in SPT basis is in a narrower range than the spectral accelerations on ground surface in Vs basis. In other words, the scattering of spectral accelerations on the ground surface was found in a wider range as a result of the analyses using Vs data.

## Acknowledgements

The data used in this study were obtained from the project supported by the Scientific Research Projects of Eskişehir Osmangazi University within the scope of project no. 201115024. The author would like to acknowledge the Eskişehir Osmangazi University, Scientific Research Project Unit.

## References

1. Bell, F.G. *Environmental Geology*, Blackwell, Malden, MA, USA, 1998.
2. De Mulder, E.F.J. *Urban Geoscience*. In: McCall GJH, De Mulder, EFJ, Marker BR (Eds.), *Urban Geoscience*. Balkema, Rotterdam, 1996, pp. 1 – 11.
3. Bell, F.G.; Cripps, J.C.; Culshaw, M.G.; O'Hara, M. Aspects of Geology in Planning. In: Culshaw MG, Bell FG, Cripps JC, O'Hara M. (Eds.), *Planning and Engineering Geology, Geological Society Engineering Geology Special Publication*, **1987**, No. 4, pp. 1–38.
4. Erdik, M.; Alpay, B.Y.; Onur, T.; Sesetyan, K.; Birgoren, G. Assessment of earthquake hazard in Turkey and neighboring regions. *Ann Geofis* **1999**; Vol. 42, pp:1125–1138.
5. Kayabalı, K.; Akın, M. Seismic hazard map of Turkey using the deterministic approach. *Eng Geol* **2003**, Vol. 69, pp. 127–137.
6. Bayrak, Y.; Yılmaztürk, A.; Öztürk, S. Relationships between fundamental seismic hazard parameters for the different source regions in Turkey. *Nat Hazards* **2005**, Vol. 36, pp. 445–462.
7. Seed, H.B.; Idriss, I.M. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (ASCE)* **1969**, Vol. 95, pp.99-137.
8. Seed, H.B.; Whitman, R.V.; Dezfulian, H.; Dobry, R., Idriss, I.M. Soil conditions and building damage in Caracas earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (ASCE)* **1972**; 98: SM8.
9. Chang, K.P.; Chang, T.S. Liquefaction Induced Earth Movements and Mitigation in an Earthquake-Prone area Developments in Geotechnical Engineering, 1994, Balasubramaniam et al. (eds), Balkana.
10. Kramer, S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1996.

11. Xu, Y.; Xia, J.; Miller, R.D. Quantitative estimation of minimum offset for multichannel surface-wave survey with actively exciting source. *J Appl Geophys* **2006**, Vol. 59(2), pp. 117-125.
12. Zhang, S.X., Chan, L.S.; Xia, J. The selection of field acquisition parameters for dispersion images from multichannel surface wave data. *Pure Appl Geophys* **2004**, Vol. 161, pp.185-201.
13. SHAKE 2000. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites; by Schnabel P B, Lysmer J, Seed HB. Report No. UCB/EERC72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, (1972), User's Manual, revised by Gustavo AO, July 2011.
14. DSİ . Eskişehir ve İnönü Ovaları Hidrojeolojik Etüt Raporu. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Jeoteknik Hizmetler ve Yeraltısuları Dairesi Başkanlığı, 49 s, Eskişehir, 1975.
15. Tokay, F.; Altunel, A. Eskişehir fay zonunun inönü-dodurga çevresinde neotektonik aktivitesi. *MTA Dergisi* **2005**, Vol.130:1-15.
16. Xia, J.; Miller, R.D.; Park, C.B. Estimation of nearsurface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics* **1999**, Vol. 64(3), pp.691–700.
17. Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J. Multi-channel analysis of surface waves. *Geophysics* **1999**, Vol. 64 (3), pp. 800-808.
18. Seyrek, E. Numerical analysis models in dam site seismic hazard analysis and an application. PhD Thesis, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey, 2009.
19. Bozkurt, E. Neotectonics of Turkey—a synthesis. *Geodinamica Acta* **2001**, Vol. 1(14), pp. 3-30.
20. Koçyiğit, A.; Yusufoglu, H.; Bozkurt, E. Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. *Journal of the Geological Society* **1999**, Vol. 156, pp. 605–616.
21. Wells, D.L.; Coppersmith, K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Seismol Soc* **1994**, Vol. 84(4), pp. 974-1002.
22. Boore, D.M.; Joyner, W.B.; Fumal, T.E. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. *Seismological Research Letters* **1997**, Vol. 68, pp.128-153.
23. Gülkan, P.; Kalkan, E. Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey. *J Seismol* **2002**, Vol. 6(3), pp. 397-409.
24. Kalkan, E.; Gülkan, P. Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey. *Earthq Spectra* **2004**, Vol. 20(4), pp. 1111-1138.
25. Bommer, J.J.; Douglas, J.; Strasser, F.O. Style-of-faulting in ground motion prediction equations. *Bull Earthq Eng* **2003**, 1:171.
26. Abrahamson, N.A.; Youngs, R.R. A stable algorithm for regression analyses using the random effects model. *Bull Seismol Soc Am* **1992**, Vol. 82, pp.505–510.
27. Hancock, J.; Bommer, J.J.; Stafford, P.J. Numbers of scaled and matched accelerograms required for inelastic dynamic analyses. *Earthq Eng Struct D* **2008**, Vol. 37(14), pp.1585–1607.
28. Vucetic, M.; Dobry, R. Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering* **1991**, Vol. 117(1), pp. 89-107.
29. Seed, H.B.; Wong, R.T.; Idriss, I.M.; Tokimatsu, K. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering* **1986**, Vol. 112(11), pp. 1016-1032.
30. İyisan, R.; Haşal, M.E. Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi. *İTÜ Dergisi/ D Mühendislik* **2011**, Vol.10(4), pp. 47-56.