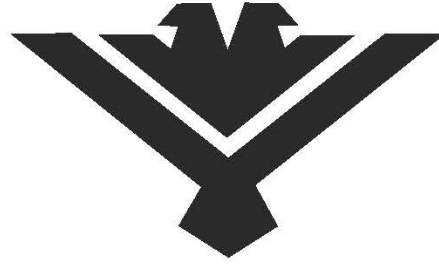


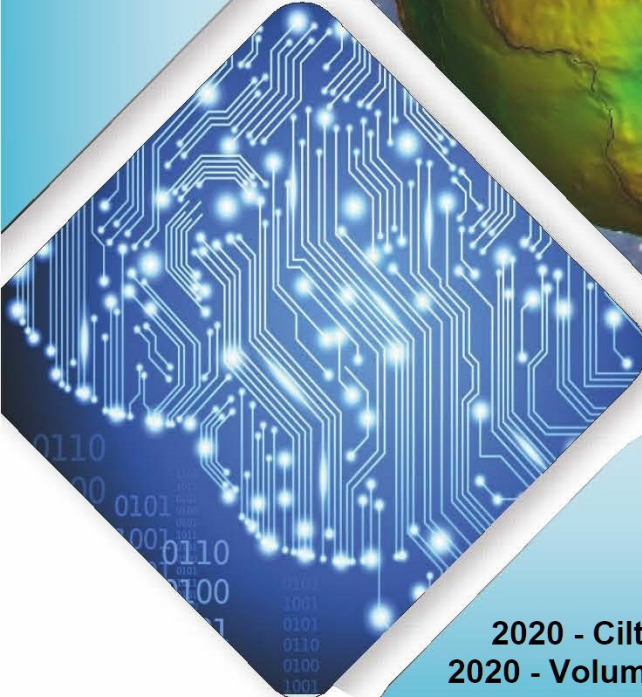


# Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

## Konya Journal of Engineering Sciences



**(KONJES)**  
E-ISSN: 2667-8055



2020 - Cilt : 8 Sayı : 1  
2020 - Volume : 8 Issue :1

**KONYA JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES (KONJES)  
KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**

**HAKEMLİ DERGİDİR**

OWNER/SAHİBİ

Owner on Behalf of Engineering and Natural Sciences Faculty of Konya Technical University **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**  
Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Adına Dekan **Prof. Dr. Ferruh YILDIZ**

Chief Editor/Şef Editör

**Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ**

Editors/Editörler

**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**  
**Assoc. Prof. Dr. Halife KODAZ**  
**Assist. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN**

Section Editors/Alan Editörleri

**Prof. Dr. Kürşad ERSOY**  
**Prof. Dr. İhsan ÖZKAN**  
**Prof. Dr. Mustafa TABAKCI**  
**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN**  
**Assoc. Prof. Dr. Afşin KULAKSIZ**  
**Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM**  
**Assist. Prof. Dr. Alpaslan YARAR**  
**Assist. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN**  
**Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN**

Advisory Board/Danışma Kurulu

|   |  |
|---|--|
| <b>Prof.Dr. Ferruh Yıldız, Konya Technical University</b>   | <b>Prof.Dr.-Ing. Rudolf Staiger, Bochum University of Applied Sciences</b> |
| <b>Prof.Dr. Reşat Ulusay, Hacettepe University</b>          | <b>Prof.Dr. Chryssy Potsiou, National Technical University of Athens</b>   |
| <b>Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University</b>            | <b>Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University</b>                 |
| <b>Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University</b> | <b>Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University</b>                    |
| <b>Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University</b>            | <b>Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University</b>                 |
| <b>Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University</b>    |  |

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

**Prof. Dr. Ali BERKTAY**

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

**Res. Assist. İsmail KOC**  
**Res. Assist Emir Ali DİNSEL**  
**Res. Assist. Aybüke BABADAG**

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Dekanlığı  
42075-Kampüs, Selçuklu, Konya-TURKEY

Tel : 0 332 223 88 18  
Fax : 0 332 241 06 35  
E-mail : [konjes@ktun.edu.tr](mailto:konjes@ktun.edu.tr)  
Web : <http://dergipark.org.tr/konjes>

## **Editorial Board/Yayın Kurulu**

Ahmet Afsin Kulaksiz, Konya Technical University, TURKEY

Alla Anohina-Naumeca, Riga Technical University, LATVIA

Ashok K. Mishra, Clemson University, USA

Baris Binici, Middle East Technical University, TURKEY

Coskun Bayrak, University of Arkansas, USA

Demetrio Fuentes Ferrera, University of Castilla-La Mancha, SPAIN

Fahrettin Ozturk, The Petroleum Institute, UAE

Haci Murat Yilmaz, Aksaray University, TURKEY

Heinz Ruther University of Cape Town, SOUTH AFRICA

Homayoun Moghimi, Payame Noor University, IRAN

Ihsan Ozkan, Konya Technical University, TURKEY

John Trinder, The University of New South Wales, AUSTRALIA

Kerim Kocak, Konya Technical University, TURKEY

Loredana Judele, Technical University of Iasi, ROMANIA

Mohamed Bouabaz, Université 20 août 1955-Skikda, ALGERIA

Mohd Arif Wani, California State University, USA

Mortaza Yari, University of Tabriz, IRAN

Ömer Aydan, University of the Ryukyus, JAPAN

Sanchoy K. Das, New Jersey Institute of Technology, USA

Selim Dogan, Konya Technical University, TURKEY

Spase Shumka, Agricultural University of Tirana, ALBANIA

Tahira Geroeva, Baku State University, AZERBAIJAN

Vladimir Androkhonov, Novosibirsk Soil Research Institute, RUSSIA

Ali Kocak, Yildiz Technical University, TURKEY

Alpaslan Yarar, Konya Technical University, TURKEY

Ataur Rahman, University of Western Sydney, AUSTRALIA

Cihan Varol Sam Houston State University, USA

Dan Stumbea, Alexandru Ioan Cuza University of Iasi, ROMANIA

Eva Burgetova, Czech Technical University, CZECH REPUBLIC

Georgieva Lilia, Heriot-Watt University, UNITED KINGDOM

Halil Kursad Ersoy, Konya Technical University, TURKEY

Hi-Ryong Byun, Pukyong National University, SOUTH KOREA

Huseyin Deveci, Konya Technical University, TURKEY

Iraida Samofalova, Perm University, RUSSIA

Juan Maria Menendez Aguado, University of de Oviedo, SPAIN

Laramie Vance Potts, New Jersey Institute of Technology, USA

Mila Koeva, University of Twente, NETHERLANDS

Mohamed Metwaly Abu Anbar, Tanta University, EGYPT

Moonis Ali Khan, King Saud University, KSA

Murat Karakus, University of Adelaide, AUSTRALIA

Saadettin Erhan Kesen, Konya Technical University, TURKEY

Selcuk Kursat Isleyen, Gazi University, TURKEY

Shukri Maxhuni, Prizen University, KOSOVA REPUBLIC

Syed Tufail Hussain Sherazi, University of Sindh, PAKISTAN

Thomas Niedoba, AGH University of Science and Technology, POLAND

Zoran Sapuric, University American College Skopje, MACEDONIA

**KONYA MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ**  
**Konya Journal of Engineering Sciences**  
**(KONJES)**

ISSN 2667 – 8055 (Elektronik)

|        |   |       |      |       |   |
|--------|---|-------|------|-------|---|
| Cilt   | 8 | Mart  | 2020 | Sayı  | 1 |
| Volume | 8 | March | 2020 | Issue | 1 |

**İÇİNDEKİLER (CONTENTS)**

**Araştırma Makalesi (Research Article)**

**KİRİŞLERDE BASINÇ DONATISI ORANININ MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİNE ETKİSİ**  
Effect of Compression Reinforcement Ratio of Beams on the Moment Curvature Relationships

.....S. Bahadır YÜKSEL, Rohullah JAMAL, Saeid FOROUGHİ 1-17

**ESNEK ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİNÖNCE KÜMELE-SONRA ROTALA TEMELLİ BİR YÖNTEM ÖNERİSİ; BİR SÜPERMARKET ÖRNEĞİ**  
Cluster-First Route-Second Approach For The Solution Of Vehicle Routing Problem With Soft Time Windows; A Supermarket Chain Application

.....Serap ERCAN CÖMERT, Harun Reşit YAZGAN, Büşra ÇAKIR, Nazan SARI 18-31

**SOLVING THE CLASSIFICATION PROBLEM OF CIRCULAR METAL OBJECTS WITH ENGRAVED CHARACTERS BY IMAGE PROCESSING METHODS**

Oyma Karakterlere Sahip Dairesel Metal Cisimlerin Sınıflandırma Probleminin Görüntü İşleme Yöntemleri İle Çözümü

.....Mahmut Sami YASAK, Hasan Erdiñç KOÇER (English) 32-50

**ÇAVUŞCUGÖL LİNYİT AÇIK OCAĞINDAKİ DURAYSIZLIKLARIN İNCELENMESİ**

Investigation of Instability Problems in the Çavuşcugöl Open Lignite Mine

.....Hakan ÖZŞEN, Berk KAYGUSUZ, Dursun KAYA 51-59

**MERRIFIELD REÇİNESİNE DESTEKLENMİŞ KALİKS[4]AREN DİNİTRO TÜREVİNİN SULU ORTAMDAKİ FENOLİK TÜRLERE KARŞI EKSTRAKSİYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Investigation of extraction properties of calix[4]arene dinitro derivative supported in merrifield resin towards phenolic species in aqueous media

.....Farabi TEMEL 60-70

**RADYOAKTIF PERTEKNETAT OKSO ANYONU ADSORPSİYONUNUN TERMODİNAMİK ANALİZİ**

Thermodynamic Analysis of Radioactive Pertechnetate Oxo Anion Adsorption

.....Fatih DEMİR, Omer LACIN, Burak BASTABAN 71-79

**EVALUATION OF POZZOLAN-LIME STABILIZATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF FINE SANDY ENGINEERING FILLS**

İnce Kumlu Mühendislik Dolgularının Fiziksel Özellikleri Üzerine Pozzolan-Kireç Stabilizasyonunun Değerlendirilmesi

.....Babak JAMHIRI (English) 80-90

**AN ANALYTICAL INVESTIGATION OF A BUILDING HAVING SOFT STOREY IRREGULARITY STRENGTHENED WITH CONCENTRICALLY STEEL BRACES**

Yumuşak Kat Düzensizliği Bulunan Bir Binanın Merkezi Çelik Çaprazlar ile Güçlendirilmesinin Analitik Olarak İncelenmesi

.....Alptuğ ÜNAL (English) 91-102

**BATIK ULTRAFİLTASYON MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜ İLE GERÇEK GRİ SU ARITIMI**

Real Greywater Treatment by Using Submerged Membrane Bioreactor

.....Can ASAN, Levent GÜREL, Hanife BÜYÜKGÜNGÖR 103-112

**HIGHLY ACTIVE AND ROBUST PALLADIUM NANOPARTICLES IMMOBILIZED ON BIODEGRADABLE MICROCAPSULES CONTAINING CHITOSAN-GUAR GUM COMPOSITE FOR SYNTHESIS OF BIARYL COMPOUNDS**

Biaril Bileşiklerinin Sentezi İçin Kitosan-Guar Sakizi Kompoziti İçeren Biyobozunur Mikrokapsüller Üzerine İmmobilize Edilmiş Oldukça Aktif ve Sağlam Paladyum Nanopartiküller

.....Talat BARAN (English) 113-121

**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A NEW THE COMBINED POWER SYSTEM USING LNG'S COLD ENERGY**

LNG'nin Soğuk Enerjisini Kullanan Yeni Bir Birleşik Güç Sistemin Termodinamik Analizi

..... Dilek Nur ÖZEN (English) 122-134

**ZAYIF KAYA MALZEMELERİNİN YERİNDE DAYANIMININ BELİRLENMESİNDE İNDEKS DENEYLERİN KULLANIMI İLE İLGİLİ BİR YAKLAŞIM**

An approach to the use of index tests in determining of in-situ strength of weak rock materials

.....İhsan ÖZKAN, Meriç KAYA 135-150

**WORKLOAD CHARACTERIZATION OF TELECOM SOFTWARE**

Telekom Yazılımı İş Yüğü Karakterizasyonu

.....Osman Ferit ÜNLÜ, Pınar BÖLÜK (English) 151-163

**GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLARDAKİ SAVAK YÜKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ**

Experimental and Numerical Modeling of Head Over Broad Crested Weirs

.....Murat Can YILDIZ, Alpaslan YARAR 164-174

**LQR KONTROLCÜ PARAMETRELERİNİN SİSTEM DAVRANIŞINA ETKİ ANALİZİ: ÇİFT ÇUBUKLU TERS SARKAÇ SİSTEMİ**

Impact Analysis of LQR Controller Parameters on System Dynamic: Double Inverted Pendulum

.....Tuğçe YAREN, Selçuk KİZİR 175-191



## KİRİŞLERDE BASINÇ DONATISI ORANININ MOMENT-EĞRİLİK İLİŞKİSİNE ETKİSİ

<sup>1</sup>S. Bahadır YÜKSEL , <sup>2</sup>Rohullah JAMAL , <sup>3</sup>Saeid FOROUGHI 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya,  
TÜRKİYE

<sup>1</sup>sbyuksel@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>jamal.rohullah@gmail.com, <sup>3</sup>saeid.foroughi@yahoo.com

(Geliş/Received: 29.05.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.08.2019)

**ÖZ:** Bu çalışmada betonarme kirişlerde farklı parametre olarak beton sınıfı, boyuna donatı olarak çekme ve basınç donatısı oranlarının moment-eğrilik davranışına etkisi araştırılmıştır. Parametrelerin değerleri değiştirilerek sayısal bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla, 66 adet farklı parametrelere sahip dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş tasarlanmıştır. Kirişlerin davranışı, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları göz önüne alınarak moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilmiştir. Analizlerde kiriş kesitlerinde beton için sargısız beton modeli kullanılmıştır. Analiz sonuçları kullanılarak akma ve kırılma durumunda moment-eğrilik değerleri, eğrilik sünekliği ve rijitlik oranları elde edilmiştir. Analiz sonuçlarından farklı parametrelerden elde edilen verilerin sonuçları çizelgeler halinde sunulmuş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Dikdörtgen en-kesitli kirişlerin davranışı, eğrilik sünekliği, rijitlik oranları, kirişlerin akma ve kırılma momentlerinin değerlerinden yararlanarak yorumlanmıştır. Betonarme kiriş elemanlarında basınç donatısı oranının artması ile akma momenti, kırılma momenti ve maksimum eğrilik değerleri artmakta fakat akma eğrilik değerleri azalmaktadır. Betonarme kiriş elemanlarında basınç donatı oranının artması ile elemanların süneklikleri ve rijitlikleri artmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Moment-eğrilik, akma momenti, kırılma momenti, doğrusal olmayan davranış, sargısız beton, eğrilik sünekliği.

### Effect of Compression Reinforcement Ratio of Beams on the Moment Curvature Relationships

**ABSTRACT:** In this study, the effect of different parameters like concrete class, longitudinal tensile and compression reinforcement ratios on the moment-curvature behavior of reinforced concrete beams was investigated. A numerical study was performed by changing the values of the parameters. For this purpose, 66 rectangular cross-section reinforced concrete beams with different parameters were designed. The behavior of the beams was obtained from the moment-curvature relationship by considering the nonlinear behavior of the materials. Unconfined concrete model was used for the beam sections in the analysis. Moment-curvature values in the case of yield and ultimate stages, curvature ductility values and stiffness ratios were obtained by using analysis results. The results obtained from the analysis by using different parameters were presented in tables and the results were evaluated. The behavior of the rectangular cross-section beams was interpreted by using the curvature ductility, stiffness ratios, yield and ultimate moments. With the increase in the ratio of compression reinforcement in the reinforced concrete beam elements, yield moment, ultimate moment and maximum curvature values are increased but yield curvature values decrease. With the increase in the ratio of compression reinforcement in the reinforced concrete beam elements, the ductility and stiffness of elements are increased.

**Key Words:** Moment curvature, yield moment, ultimate moment, nonlinear behavior, unconfined concrete, curvature ductility.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme yapı elemanlarının davranışını, elemana ait kesit davranışı belirlemektedir. Kesit davranışı, kesitte kullanılan malzeme, kesitin geometrisi ve kesite etki eden yüklemelere bağlıdır. Eğilme etkisi altındaki bir kesitin davranışı ise en sağlıklı biçimde moment eğrilik ilişkisinden belirlenebilir (Canbay ve diğ., 2010). Kesitin rijitlik ve dayanımının nasıl değiştiği, kesit davranışının süneklik durumu gibi olaylar yine moment-eğrilik ilişkisi üzerinden izlenebilir (Ersoy ve Özcebe, 2012). Yapıların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için, yapı elemanlarının yeterli dayanımlarının yanında bu dayanımlarını sürdürebilmeleri için elemanların sünek olmaları gerekmektedir. Betonarme kiriş davranışının kavranabilmesi, kesit davranışının iyi bilinmesi ile mümkündür. Kesit davranışı ise, en sağlıklı biçimde moment-eğrilik ilişkisi üzerinden elde edilir (Çağlar ve diğ., 2014).

Betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışına etki eden faktörler; çekme ve basınç donatısı oranı, enine donatının çapı, aralığı ve betonun basınç dayanımıdır. Farklı parametrelerde eşit en-kesit alanına sahip dikdörtgen betonarme kiriş kesit modelleri tasarlanmış ve bu modellerin davranışına; beton sınıfının, çekme ve basınç donatısı oranlarının moment-eğrilik ilişkisine olan etkisi araştırılmıştır. İncelenen parametrelerin davranış etkileri, akma ve kırılma durumunda moment ve eğrilik değerleri, eğrilik sünekliği ve rijitlik değerleri üzerinden değerlendirilmiştir. Farklı parametrelerde tasarlanan dikdörtgen en-kesitli betonarme kiriş modelleri için çizilen moment-eğrilik eğrileri karşılaştırarak yorumlanmıştır. Betonarme elemanların doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak analizler SAP2000 (Ver.20.2.0) programında gerçekleştirilmiştir. Betonarme kiriş kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki donatı oranının, dengeli orandan küçük olmasını sağlamaktır. Bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500 (2000)'de verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. TS500 (2000)'de betonarme kirişlerde sünek davranışın sağlanabilmesi için, donatı oranı Denklem (2 ve 3) ile sınırlandırılmıştır.

$$\rho_b = 0.85k_1 \left( \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \right) \left( \frac{600}{600 + f_{yd}} \right) \quad (1)$$

$$\rho_{max} = 0.85\rho_b \quad (2)$$

$$(\rho - \rho') \leq \rho_{max}, \quad \rho \leq \rho_{max}; 0.02 \quad (3)$$

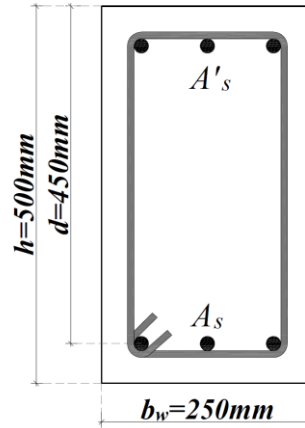
Sabit geometride, farklı beton sınıfı, boyuna donatı olarak sabit çekme ve farklı basınç donatı oranlarına sahip toplam 66 adet betonarme kiriş modeli tasarlanmıştır. Betonarme kiriş modellerinin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (TS500, 2000)'de verilen hükümler dikkate alınmıştır. Farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modellerinde çekme donatısı oranı olarak;  $\rho_{max} = 0.85\rho_b$  ve basınç donatı oranı olarak;  $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$  ve  $\rho_{max}$  değerleri dikkate alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde C25, C30, C35, C40, C45 ve C50 olarak altı farklı beton sınıfı dikkate alınmıştır. Kiriş modellerinde her beton sınıfı için çekme donatısı oranı  $\rho_{max} = 0.85\rho_b$  olacak şekilde sabit tutulmuş basınç donatısı oranları değiştirilerek kesitlerin moment-eğrilik ilişkisi araştırılmıştır. İncelenen parametrelerin davranış etkileri, eğrilik sünekliği, rijitlik oranları ve kiriş taşıma gücü momentleri üzerinden değerlendirilmiş ve karşılaştırarak yorumlanmıştır.

Betonarme kiriş kesitleri için SAP2000 programında malzeme modelleri tanımlanmıştır. SAP2000 programında tanımlanan beton ve donatı çeliği için hesaplarda ve malzeme modellerinde kullanılan parametreler Çizelge 1'de özetlenmiştir. Kirişlerde eksenel yükün maksimum değeri  $N = 0.10 \times A_c \times f_c$  olacak şekilde sınırlandırılmıştır (TBDY, 2018). Betonarme kirişlerin analizlerinde eksenel yükün değeri  $N=0$  olarak alınmıştır. Betonarme kesitlerde eksenel yükün olmadığı durumlarda sargı donatısının etkisi azalmaktadır. Bundan dolayı analizlerde beton modeli olarak Mander sargısız beton modeli (Mander ve diğ., 1988) kullanılmıştır.



**MATERYAL ve METOT (MATERIALS and METHODS)**

Betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkilerini etkileyen ve tasarım aşamasında birer parametre olarak düşünülen, beton basınç dayanımı, çekme donatısı oranı ve basınç donatısı oranı gibi faktörlerin moment-eğrilik davranışına olan etkisinin incelenmesi bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır. Bu amaçla kiriş kesitlerin moment-eğrilik ilişkisi araştırılarak akma ve kırılma durumunda moment ve eğrilik değerleri, eğrilik sünekliği ve rijitlik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri farklı parametrelere göre karşılaştırmalı olarak grafikler halinde sunulmuştur. Moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen değerler çizelgeler halinde karşılaştırmalı olarak özetlenmiştir. Tasarım parametrelerinin incelenmesi için analizlerde dikkate alınan kiriş kesiti 250mm×500mm boyutlarında olup Şekil 1’de kesit geometrisi ve donatı yerleşim planı verilmiştir. Şekil 1’de  $A'_s$ ; çekme donatısı alanını,  $A_s$ ; basınç donatısı alanını ifade etmektedir. Beton basınç dayanımı ile bağımlı olarak incelenen parametre; sabit çekme donatısı oranına göre basınç donatısı oranıdır. Bu amaçla 66 adet farklı betonarme kiriş modelinin moment-eğrilik analizi yapılmıştır.



**Şekil 1.** Tasarlanan kiriş modellerinin en-kesit detayları

*Figure 1. Cross-section details of designed beam models*

Betonarme kiriş kesit hesabı ve tasarımı yapılırken dikkate edilmesi gereken en önemli husus, elde edilen kesitteki donatı oranının, yönetmeliklerce öngörülen maksimum donatı oranından küçük olmasını sağlamaktır. Bu koşul yönetmeliklerce zorunlu olduğu için bu çalışmada TS500 (2000)'e göre Denklem (2 ve 3)'te verilen sınır değerler dikkate alınmıştır. Bu çalışmada betonarme kirişlerin eğrilik sünekliği gibi parametrelerinin araştırılması için sabit çekme donatısı oranı dikkate alınmıştır. Hesaplarda çekme donatısı oranı ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b$ ) tüm kiriş modellerinde sabit alınmıştır. Betonarme kiriş modellerinde basınç donatısı oranları ( $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$  ve  $\rho_{max}$ ) değiştirilerek kiriş elemanlarının moment-eğrilik ilişkileri incelenmiştir. Beton basınç dayanımının kiriş davranışı üzerinde etkisini araştırmak için farklı beton basınç dayanımları (C25, C30, C35, C40, C45, C50) dikkate alınmıştır. Çizelge 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'den görüleceği gibi kirişlerde sabit beton sınıfı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranı sıfırdan maksimum donatı oranına kadar 11 farklı değer verilerek değiştirilmiştir.

Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak ise eğrilik sünekliği ( $\mu$ ), eğrilik süneklik oranı ( $\mu_o$ ) olacak şekilde Denklem (4 ve 10) ile ifade edilir. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin ( $k_u$ ), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe ( $k_y$ ) oranıdır.

$$\mu = \frac{k_u}{k_y} \quad (4)$$

Moment-eğrilik grafiğinin ilk doğrunun eğimi, çatlama kesite ait etkin eğilme rijitliğine ( $EI$ ) karşılık gelmektedir (Çağlar ve diğ., 2014). Betonarme kirişlerin etkin eğilme rijitliği Denklem (5) ile hesaplanmıştır. Denklem (5)'te  $M_y$  ve  $k_y$  sırasıyla akma momenti ve akma eğriliğidir.

$$EI_e = \frac{M_y}{k_y} \quad (5)$$

Betonarme kirişlerin kesit geometrisi ( $b$  ve  $h$ ) ve betonun elastisite modülüne ( $E_c$ ) göre çatlama kesit rijitlikleri ( $EI$ ) Denklem (6 ve 7) ile hesaplanmıştır. Farklı beton sınıfları için (TS-500, 2000)'de verilen beton karakteristik basınç dayanımlarına ( $f_{ck}$ ) göre beton elastisite modülleri ( $E_c$ ) hesaplanmıştır.  $I$ ; betonarme kirişlerin brüt atalet momentidir ve kesit geometrisine göre hesaplanmaktadır.

$$E_c = 3250 + \sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad (6)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (7)$$

Betonarme kirişler için hesaplanan etkin eğilme rijitliği ve çatlama kesit eğilme rijitliklerinden etkin rijitlik çarpanları ( $k_e$ ) Denklem (8)'den hesaplanmıştır.

$$k_e = \frac{EI_e}{EI} \quad (8)$$

Betonarme kirişlerde moment-eğrilik ilişkilerinden akma ve kırılma durumları için moment ( $M_y, M_u$ ) ve eğrilik ( $K_y, K_u$ ) değerleri, akma ve kırılma eğriliklerinden eğrilik süneklikleri ( $\mu$ ), akma momentleri ve akma eğriliklerinden etkin eğilme rijitlikleri ( $EI_e$ ) ve etkin rijitlik çarpanları ( $k_e$ ) hesaplanmıştır.

Denklem (5) ile hesaplanan etkin eğilme rijitline göre betonarme kirişlerin farklı parametreler (basınç donatı oranı ve beton basınç dayanımı) için etkin eğilme rijitlik oranları ( $EI_0$ ) Denklem (9)'a göre hesaplanmıştır.

$EI_{e-1}$ ; maksimum çekme donatısı oranına sahip basınç donatısı olmayan betonarme kirişlerin ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b, \rho'_s = 0.0$ ) etkin eğilme rijitliği değeridir.  $EI_{e-i}$ ; maksimum çekme donatısı oranı ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b$ ) ve farklı basınç donatısı oranına sahip ( $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$  ve  $\rho_{max}$ ) 11 farklı kiriş modelinin etkin eğilme rijitliği değerleridir.

$$EI_0 = \frac{EI_{e-i}}{EI_{e-1}} \quad (9)$$

Denklem (4) ile hesaplanan eğrilik süneklik katsayısına göre betonarme kirişlerin farklı parametreler (basınç donatı oranı ve beton basınç dayanımı) için eğrilik süneklik oranları ( $\mu_0$ ) Denklem (10)'a göre hesaplanmıştır.  $\mu_{0-1}$ ; maksimum çekme donatısı oranına sahip basınç donatısı olmayan betonarme kirişlerin ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b, \rho'_s = 0.0$ ) eğrilik süneklik değeridir.  $\mu_{0-i}$ ; maksimum çekme donatısı oranı ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b$ ) ve farklı basınç donatısı oranına sahip ( $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$  ve  $\rho_{max}$ ) 11 farklı kiriş modelinin eğrilik süneklik değerleridir.

$$\mu_0 = \frac{\mu_{0-i}}{\mu_{0-1}} \quad (10)$$

Betonarme kiriş kesitlerinde moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen akma ve kırılma durumları için moment ( $M_y, M_u$ ) değerlerine göre farklı parametrelere sahip betonarme kirişler için  $M_{yi}/M_{y1}$  ve  $M_{ui}/M_{u1}$  oran değerleri hesaplanmıştır.  $M_{y1}$  ve  $M_{u1}$ ; maksimum çekme donatısı oranına sahip basınç

donatısı olmayan betonarme kirişlerin ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b$ ,  $\rho'_s = 0.0$ ) akma ve kırılma momentleridir.  $M_{yi}$  ve  $M_{ui}$ ; sabit beton basınç dayanımı ve maksimum çekme donatısı oranı ( $\rho_s = \rho_{max} = 0.85\rho_b$ ) ve farklı basınç donatısı oranına sahip ( $\rho'_s = 0.0, 0.1\rho_{max}, 0.2\rho_{max}, 0.3\rho_{max}, 0.4\rho_{max}, 0.5\rho_{max}, 0.6\rho_{max}, 0.7\rho_{max}, 0.8\rho_{max}, 0.9\rho_{max}$  ve  $\rho_{max}$ ) 11 farklı kirişin akma ve kırılma momentleridir.

**Çizelge 1.** Malzeme modellerinde kullanılan parametreler (TBDY, 2018)

*Table 1. Material parameters used in the model*

| Malzeme               | Parametre  | Değer    |
|-----------------------|--|----------|
| Beton Sınıfı: C25-C50 | Sargısız betonun maksimum gerilmeye ulaştığı birim şekil değiştirme değeri ( $\epsilon_{co}$ ) | 0.002    |
|                       | Sargısız betonun nihai birim şekil-değiştirme ( $\epsilon_{cu}$ )                              | 0.0035   |
|                       | Karakteristik beton basınç dayanımı ( $f_{ck}$ )   | 25-50MPa |
| Donatı Çeliği: S420   | Donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_{sy}$ )                             | 0.0021   |
|                       | Donatı çeliğinin pekleşme birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_{sp}$ )                         | 0.008    |
|                       | Donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi ( $\epsilon_{su}$ )                            | 0.08     |
|                       | Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı ( $f_{yk}$ )                                      | 420MPa   |
|                       | Donatı çeliğinin karakteristik kopma dayanımı ( $f_{su}$ )                                     | 550MPa   |

**Çizelge 2.** Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.

*Table 2. Parameters of models designed as type-1*

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$ ( $mm^2$ ) | $A'_s$ ( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|------------------|-------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-1       | B1-0     | C25          | 1991.3           | 0.0               | 0.0208   | 0.0177 | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B1-1     |              |                  | 199.1             |          |        | 0.0018  | 0.77                          |
|             | B1-2     |              |                  | 398.3             |          |        | 0.0035  | 0.68                          |
|             | B1-3     |              |                  | 597.4             |          |        | 0.0053  | 0.60                          |
|             | B1-4     |              |                  | 796.5             |          |        | 0.0071  | 0.51                          |
|             | B1-5     |              |                  | 995.6             |          |        | 0.0089  | 0.43                          |
|             | B1-6     |              |                  | 1194.8            |          |        | 0.0106  | 0.34                          |
|             | B1-7     |              |                  | 1393.9            |          |        | 0.0124  | 0.26                          |
|             | B1-8     |              |                  | 1593.0            |          |        | 0.0142  | 0.17                          |
|             | B1-9     |              |                  | 1792.1            |          |        | 0.0159  | 0.09                          |
|             | B1-10    |              |                  | 1991.3            |          |        | 0.0177  | 0.00                          |

**Çizelge 3.** Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.

*Table 3. Parameters of models designed as type-2*

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$ ( $mm^2$ ) | $A'_s$ ( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|------------------|-------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-2       | B2-0     | C30          | 2261.3           | 0.0               | 0.0236   | 0.0201 | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B2-1     |              |                  | 226.1             |          |        | 0.0020  | 0.77                          |
|             | B2-2     |              |                  | 452.3             |          |        | 0.0040  | 0.68                          |
|             | B2-3     |              |                  | 678.4             |          |        | 0.0060  | 0.60                          |
|             | B2-4     |              |                  | 904.5             |          |        | 0.0080  | 0.51                          |
|             | B2-5     |              |                  | 1130.6            |          |        | 0.0101  | 0.43                          |
|             | B2-6     |              |                  | 1356.8            |          |        | 0.0121  | 0.34                          |
|             | B2-7     |              |                  | 1582.9            |          |        | 0.0141  | 0.26                          |
|             | B2-8     |              |                  | 1809.0            |          |        | 0.0161  | 0.17                          |
|             | B2-9     |              |                  | 2035.1            |          |        | 0.0181  | 0.08                          |
|             | B2-10    |              |                  | 2261.3            |          |        | 0.0201  | 0.00                          |

**Çizelge 4.** Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.*Table 4. Parameters of models designed as type-3*

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$<br>( $mm^2$ ) | $A'_s$<br>( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|---------------------|----------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-3       | B3-0     | C35          | 2508.8              | 0.0                  | 0.0262   | 0.0223 | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B3-1     |              |                     | 250.9                |          |        | 0.0022  | 0.77                          |
|             | B3-2     |              |                     | 501.8                |          |        | 0.0045  | 0.68                          |
|             | B3-3     |              |                     | 752.6                |          |        | 0.0067  | 0.60                          |
|             | B3-4     |              |                     | 1003.5               |          |        | 0.0089  | 0.51                          |
|             | B3-5     |              |                     | 1254.4               |          |        | 0.0112  | 0.43                          |
|             | B3-6     |              |                     | 1505.3               |          |        | 0.0134  | 0.34                          |
|             | B3-7     |              |                     | 1756.1               |          |        | 0.0156  | 0.26                          |
|             | B3-8     |              |                     | 2007.0               |          |        | 0.0178  | 0.17                          |
|             | B3-9     |              |                     | 2257.9               |          |        | 0.0201  | 0.08                          |
|             | B3-10    |              |                     | 2508.8               |          |        | 0.0223  | 0.00                          |

**Çizelge 5.** Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.*Table 5. Parameters of models designed as type-4*

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$<br>( $mm^2$ ) | $A'_s$<br>( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|---------------------|----------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-4       | B4-0     | C40          | 2835                | 0.0                  | 0.0296   | 0.0252 | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B4-1     |              |                     | 283.5                |          |        | 0.0025  | 0.77                          |
|             | B4-2     |              |                     | 567.0                |          |        | 0.0050  | 0.68                          |
|             | B4-3     |              |                     | 850.5                |          |        | 0.0076  | 0.60                          |
|             | B4-4     |              |                     | 1134.0               |          |        | 0.0101  | 0.51                          |
|             | B4-5     |              |                     | 1417.5               |          |        | 0.0126  | 0.43                          |
|             | B4-6     |              |                     | 1701.0               |          |        | 0.0151  | 0.34                          |
|             | B4-7     |              |                     | 1984.5               |          |        | 0.0176  | 0.26                          |
|             | B4-8     |              |                     | 2268.0               |          |        | 0.0202  | 0.17                          |
|             | B4-9     |              |                     | 2551.5               |          |        | 0.0227  | 0.08                          |
|             | B4-10    |              |                     | 2835.0               |          |        | 0.0252  | 0.00                          |

**Çizelge 6.** Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.*Table 6. Parameters of models designed as type-5*

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$<br>( $mm^2$ ) | $A'_s$<br>( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|---------------------|----------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-5       | B5-0     | C45          | 3026.3              | 0.0                  | 0.0316   | 0.0269 | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B5-1     |              |                     | 302.6                |          |        | 0.0027  | 0.77                          |
|             | B5-2     |              |                     | 605.3                |          |        | 0.0054  | 0.68                          |
|             | B5-3     |              |                     | 907.9                |          |        | 0.0081  | 0.60                          |
|             | B5-4     |              |                     | 1210.5               |          |        | 0.0108  | 0.51                          |
|             | B5-5     |              |                     | 1513.1               |          |        | 0.0135  | 0.43                          |
|             | B5-6     |              |                     | 1815.8               |          |        | 0.0161  | 0.34                          |
|             | B5-7     |              |                     | 2118.4               |          |        | 0.0188  | 0.26                          |
|             | B5-8     |              |                     | 2421.0               |          |        | 0.0215  | 0.17                          |
|             | B5-9     |              |                     | 2723.6               |          |        | 0.0242  | 0.08                          |
|             | B5-10    |              |                     | 3026.3               |          |        | 0.0269  | 0.00                          |

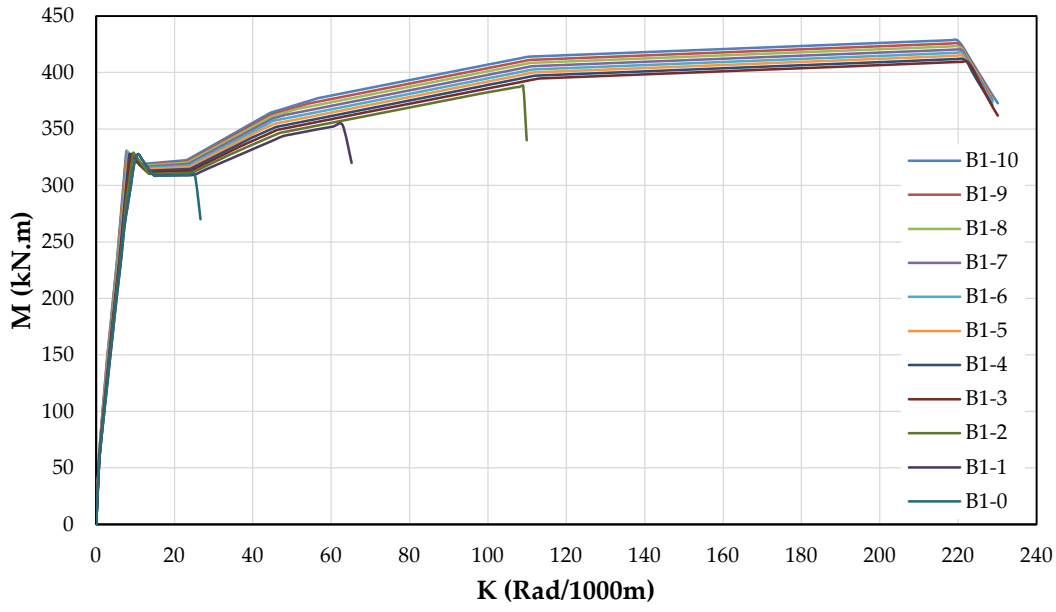
Çizelge 7. Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait parametreler.

Table 7. Parameters of models designed as type-6

| Kesit Grubu | Kesit No | Beton Sınıfı | $A_s$<br>( $mm^2$ ) | $A'_s$<br>( $mm^2$ ) | $\rho_b$ | $\rho$ | $\rho'$ | $\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$ |
|-------------|----------|--------------|---------------------|----------------------|----------|--------|---------|-------------------------------|
| Tip-6       | B6-0     | C50          |                     | 0.0                  |          |        | 0.0000  | 0.85                          |
|             | B6-1     |              | 318.4               |                      |          | 0.0028 | 0.77    |                               |
|             | B6-2     |              | 636.8               |                      |          | 0.0057 | 0.68    |                               |
|             | B6-3     |              | 955.1               |                      |          | 0.0085 | 0.60    |                               |
|             | B6-4     |              | 1273.5              |                      |          | 0.0113 | 0.51    |                               |
|             | B6-5     |              | 3183.8              | 1591.9               | 0.0333   | 0.0283 | 0.0142  | 0.43                          |
|             | B6-6     |              | 1910.3              |                      |          | 0.0170 | 0.34    |                               |
|             | B6-7     |              | 2228.6              |                      |          | 0.0198 | 0.26    |                               |
|             | B6-8     |              | 2547.0              |                      |          | 0.0226 | 0.17    |                               |
|             | B6-9     |              | 2865.4              |                      |          | 0.0255 | 0.09    |                               |
|             | B6-10    |              | 3183.8              |                      |          | 0.0283 | 0.00    |                               |

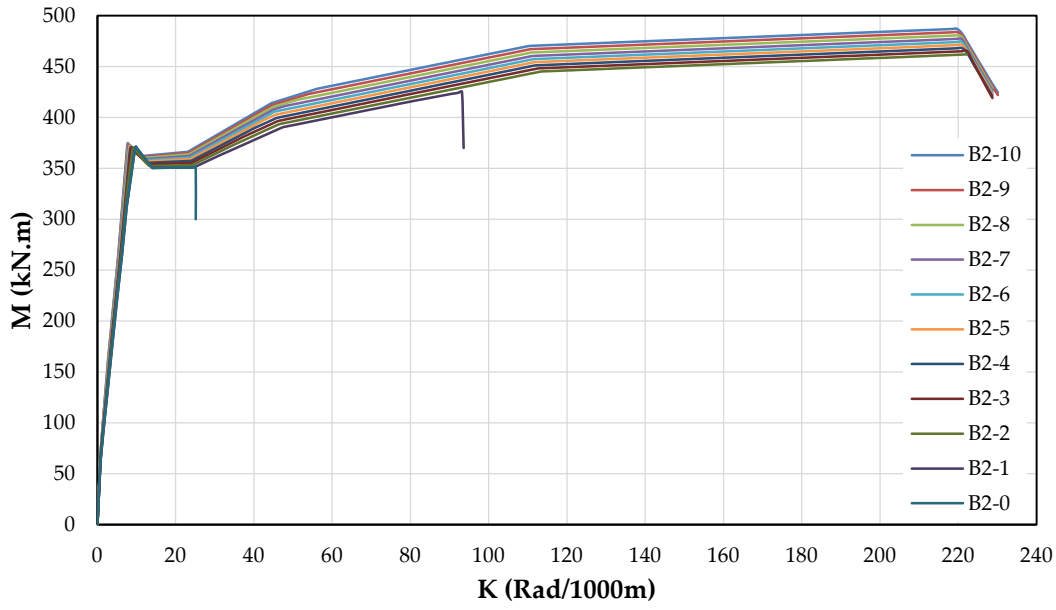
#### ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL STUDY)

Betonarme kiriş elemanlarının doğrusal olmayan davranışının incelenerek bu davranışı etkileyen parametrelerin araştırması yapılmıştır. Betonarme kiriş elemanlarının davranışı moment-eğrilik ilişkisinden incelenmiştir. Moment-eğrilik ilişkileri ise malzemelerin doğrusal olmayan davranışları dikkate alınarak farklı parametreler için SAP2000 programı ile elde edilmiştir. Betonarme kolon kesitin üç farklı malzeme modelinden oluştuğu düşünülmüştür. SAP2000 programı ile yapılan moment-eğrilik analizlerinde, kabuk betonu için Mander sargısız beton modeli, çekirdek betonu için Mander sargılı beton modeli (Mander ve diğ., 1988) ve donatı çeliği için Çizelge (1)'de verilen pekleşmeli model kullanılmıştır. Analiz sonuçlarından elde edilen moment-eğrilik grafiklerinden farklı modeller ve parametreler için elde edilen sınır değerler ( $k_y$ ,  $M_y$ ,  $k_u$ ,  $M_u$ ) çizelgeler halinde özetlenmiştir. Eğrilik sünekliği ise moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen  $k_y$  ve  $k_u$  değerlerinden faydalanarak Denklem (4)'ten hesaplanmıştır. Analitik çalışmanın kapsamında 66 adet farklı parametrelerde tasarlanan betonarme kiriş modelleri üzerinde analizler ve hesaplamalar yapılarak moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Daha sonra elde edilen ilişkilere göre elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak çizelgeler halinde özetlenmiştir. Farklı parametrelere göre incelenen kiriş modelleri için analizlerden elde edilen moment-eğrilik grafikleri Şekil 2, 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir.



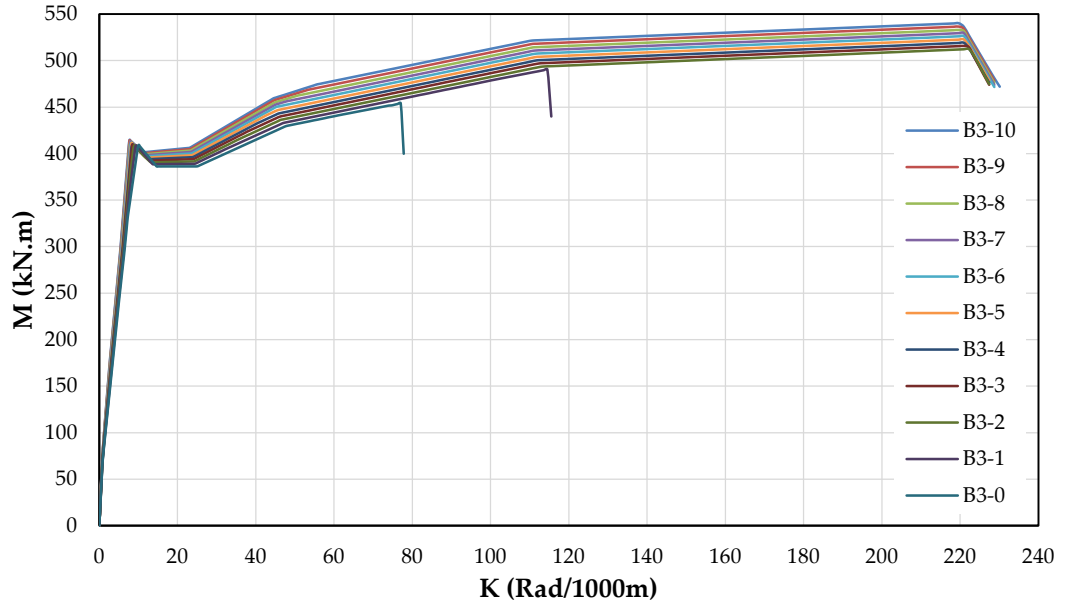
Şekil 2. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 2. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-1



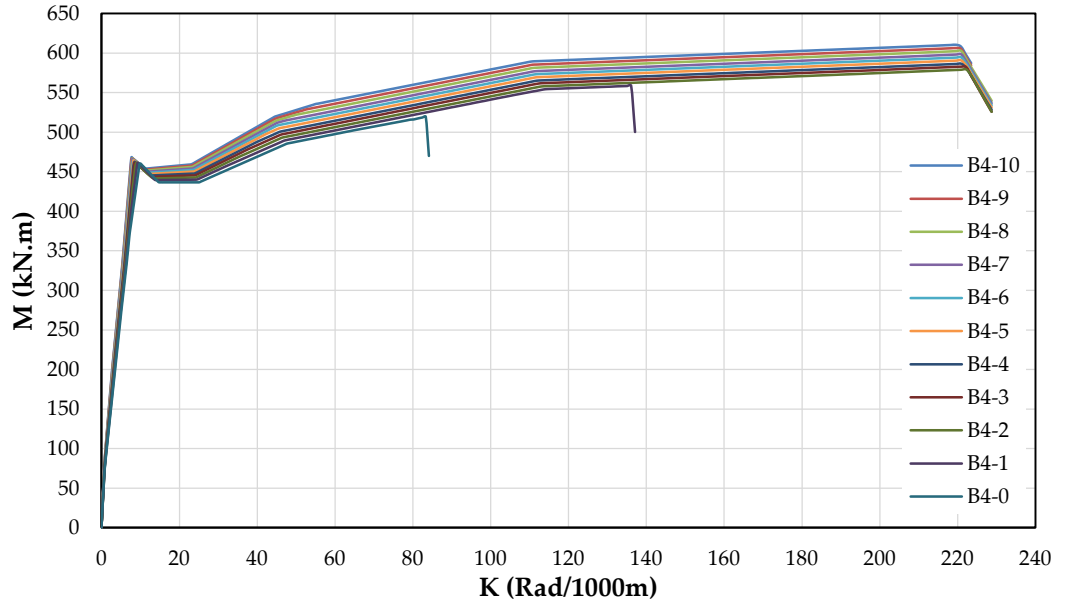
Şekil 3. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 3. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-2



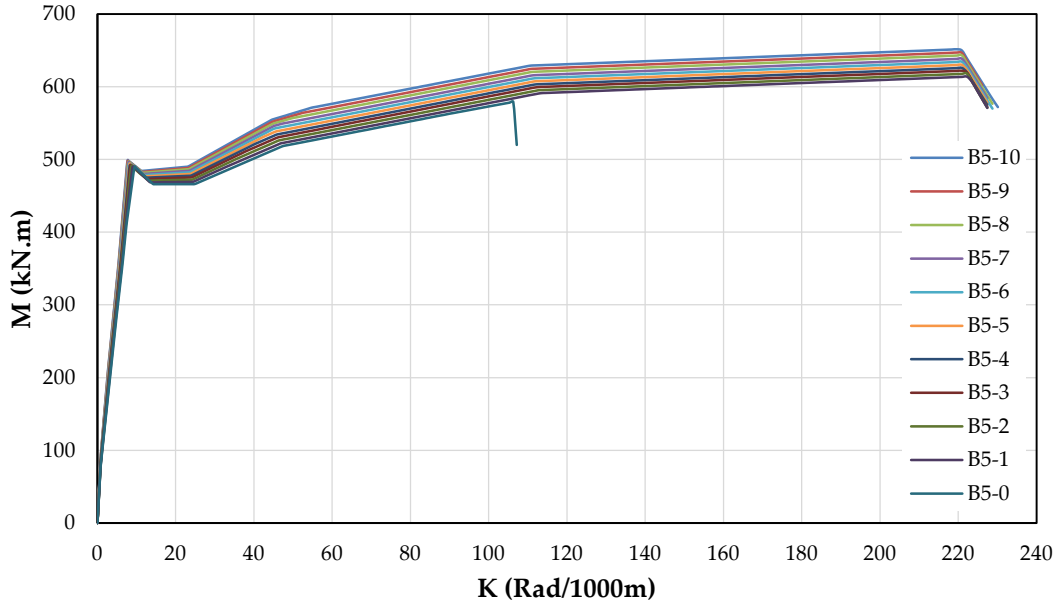
Şekil 4. Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 4. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-3



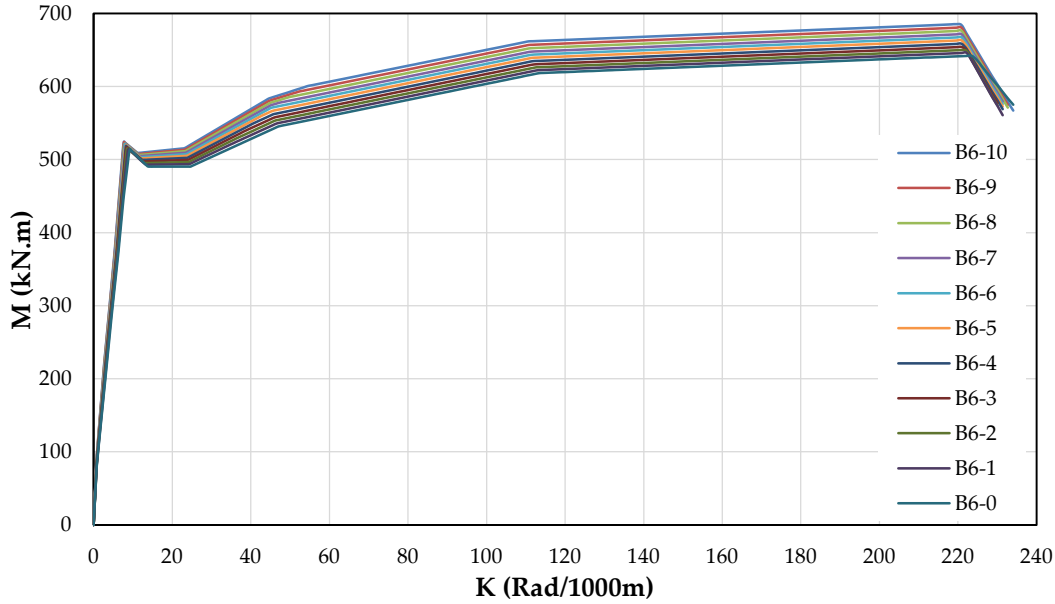
Şekil 5. Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 5. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-4



Şekil 6. Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 6. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-5



Şekil 7. Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait karşılaştırmalı moment eğrilik grafikleri.

Figure 7. Comparative moment curvature graphs of beam models designed as Type-6

Betonarme kiriş kesitlerinin moment-eğrilik ilişkilerinden kesitte oluşan hasar bölgelerinin sınırları farklı parametreler için irdelenmiştir. Betonarme kiriş kesitlerinde akma ve kırılma durumları için moment ( $M_y$ ,  $M_u$ ) ve eğrilik ( $K_y$ ,  $K_u$ ) değerleri,  $M_{yi}/M_{y1}$  oranları,  $M_{ui}/M_{u1}$  oranları, etkin eğilme rijitlikleri ( $EL_e$ ), etkin eğilme rijitlik oranları ( $EL_o$ ), eğrilik sünekliği ( $\mu$ ) ve eğrilik süneklik oranları ( $\mu_o$ ) Çizelge (8, 9, 10, 11, 12 ve 13)'te özetlenmiştir. Eğrilik sünekliği ( $\mu$ ) Denklem (4), etkin eğilme rijitlikleri ( $EL_e$ ) Denklem (5), etkin eğilme rijitlik oranları ( $EL_o$ ) Denklem (9), ve eğrilik süneklik oranları ( $\mu_o$ ) Denklem (10) ile hesaplanmıştır. Çizelgelerde moment ( $M_y$ ,  $M_u$ ) değerleri;  $kNm$ , eğrilik ( $K_y$ ,  $K_u$ ) değerleri  $Rad \times 10^3/m$  ve Etkin eğilme rijitliği ( $EL_e$ );  $kN.m^2$  olarak verilmiştir.



Çizelge 8. Tip-1 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

Table 8. Analysis results of beam models designed as type-1

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN.m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN.m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B1-0     | 312.2           | 10.3              | 1.00            | 324.0           | 38.4              | 1.00            | 30.3   | 1.00   | 3.7   | 1.0     |
| B1-1     | 324.9           | 10.0              | 1.04            | 355.1           | 65.2              | 1.10            | 32.5   | 1.07   | 6.5   | 1.8     |
| B1-2     | 325.6           | 9.4               | 1.04            | 388.0           | 109.0             | 1.20            | 34.7   | 1.14   | 11.6  | 3.1     |
| B1-3     | 326.0           | 8.8               | 1.04            | 409.6           | 222.2             | 1.26            | 37.0   | 1.22   | 25.2  | 6.8     |
| B1-4     | 326.5           | 8.4               | 1.05            | 412.2           | 222.2             | 1.27            | 38.7   | 1.28   | 26.4  | 7.1     |
| B1-5     | 326.5           | 8.3               | 1.05            | 415.0           | 222.2             | 1.28            | 39.6   | 1.30   | 26.9  | 7.2     |
| B1-6     | 326.7           | 8.1               | 1.05            | 417.8           | 222.2             | 1.29            | 40.3   | 1.33   | 27.4  | 7.4     |
| B1-7     | 327.1           | 8.0               | 1.05            | 419.8           | 222.2             | 1.30            | 40.9   | 1.35   | 27.8  | 7.5     |
| B1-8     | 328.1           | 7.9               | 1.05            | 423.2           | 222.2             | 1.31            | 41.7   | 1.38   | 28.2  | 7.6     |
| B1-9     | 328.3           | 7.8               | 1.05            | 426.1           | 222.2             | 1.32            | 42.3   | 1.39   | 28.6  | 7.7     |
| B1-10    | 329.1           | 7.7               | 1.05            | 428.9           | 222.2             | 1.32            | 42.9   | 1.41   | 29.0  | 7.8     |

Çizelge 9. Tip-2 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.

Table 9. Analysis results of beam models designed as type-2

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN,m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN,m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B2-0     | 362.3           | 10.1              | 1.00            | 366.8           | 58.0              | 1.00            | 35.9   | 1.00   | 5.7   | 1.0     |
| B2-1     | 367.5           | 9.6               | 1.01            | 425.1           | 93.2              | 1.16            | 38.2   | 1.06   | 9.7   | 1.7     |
| B2-2     | 367.6           | 9.0               | 1.01            | 462.0           | 222.2             | 1.26            | 40.7   | 1.13   | 24.6  | 4.3     |
| B2-3     | 368.6           | 8.6               | 1.02            | 465.1           | 222.2             | 1.27            | 43.0   | 1.20   | 25.9  | 4.5     |
| B2-4     | 368.7           | 8.3               | 1.02            | 468.1           | 222.2             | 1.28            | 44.3   | 1.24   | 26.7  | 4.7     |
| B2-5     | 369.1           | 8.2               | 1.02            | 471.2           | 222.2             | 1.28            | 45.0   | 1.25   | 27.1  | 4.7     |
| B2-6     | 370.3           | 8.1               | 1.02            | 474.3           | 222.2             | 1.29            | 46.0   | 1.28   | 27.6  | 4.8     |
| B2-7     | 371.0           | 8.0               | 1.02            | 477.0           | 222.2             | 1.30            | 46.6   | 1.30   | 27.9  | 4.9     |
| B2-8     | 372.0           | 7.8               | 1.03            | 478.9           | 222.2             | 1.31            | 47.5   | 1.32   | 28.4  | 4.9     |
| B2-9     | 372.7           | 7.7               | 1.03            | 480.8           | 222.2             | 1.31            | 48.1   | 1.34   | 28.7  | 5.0     |
| B2-10    | 373.0           | 7.6               | 1.03            | 487.0           | 222.2             | 1.33            | 48.8   | 1.36   | 29.1  | 5.1     |

**Çizelge 10.** Tip-3 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.*Table 10. Analysis results of beam models designed as type-3*

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN,m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN,m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B3-0     | 406.7           | 9.9               | 1.00            | 454.2           | 77.03             | 1.00            | 41.2   | 1.00   | 7.8   | 1.0     |
| B3-1     | 406.8           | 9.3               | 1.00            | 490.4           | 114.5             | 1.08            | 43.8   | 1.06   | 12.3  | 1.6     |
| B3-2     | 407.8           | 8.8               | 1.00            | 512.5           | 222.2             | 1.13            | 46.4   | 1.13   | 25.3  | 3.2     |
| B3-3     | 408.0           | 8.5               | 1.00            | 515.7           | 222.2             | 1.14            | 48.2   | 1.17   | 26.3  | 3.4     |
| B3-4     | 408.4           | 8.3               | 1.00            | 519.2           | 222.2             | 1.14            | 49.4   | 1.20   | 26.9  | 3.5     |
| B3-5     | 409.3           | 8.1               | 1.01            | 522.7           | 222.2             | 1.15            | 50.3   | 1.22   | 27.3  | 3.5     |
| B3-6     | 409.5           | 8.0               | 1.01            | 526.2           | 222.2             | 1.16            | 51.1   | 1.24   | 27.7  | 3.6     |
| B3-7     | 410.2           | 7.9               | 1.01            | 529.6           | 222.2             | 1.17            | 51.9   | 1.26   | 28.1  | 3.6     |
| B3-8     | 410.7           | 7.8               | 1.01            | 533.0           | 222.2             | 1.17            | 52.6   | 1.28   | 28.5  | 3.7     |
| B3-9     | 411.5           | 7.7               | 1.01            | 536.6           | 222.2             | 1.18            | 53.3   | 1.29   | 28.8  | 3.7     |
| B3-10    | 414.2           | 7.6               | 1.02            | 540.3           | 222.2             | 1.19            | 54.3   | 1.32   | 29.2  | 3.7     |

**Çizelge 11.** Tip-4 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.*Table 11. Analysis results of beam models designed as type-4*

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN,m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN,m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B4-0     | 458.3           | 9.8               | 1.00            | 519.4           | 83.3              | 1.00            | 46.7   | 1.00   | 8.5   | 1.0     |
| B4-1     | 459.2           | 9.3               | 1.00            | 558.4           | 136.1             | 1.07            | 49.6   | 1.06   | 14.7  | 1.7     |
| B4-2     | 460.1           | 8.8               | 1.00            | 579.1           | 222.2             | 1.11            | 52.3   | 1.12   | 25.3  | 3.0     |
| B4-3     | 460.7           | 8.5               | 1.01            | 582.7           | 222.2             | 1.12            | 54.3   | 1.16   | 26.2  | 3.1     |
| B4-4     | 460.7           | 8.3               | 1.01            | 586.6           | 222.2             | 1.13            | 55.6   | 1.19   | 26.8  | 3.2     |
| B4-5     | 461.2           | 8.2               | 1.01            | 590.5           | 222.2             | 1.14            | 56.4   | 1.21   | 27.2  | 3.2     |
| B4-6     | 461.9           | 8.0               | 1.01            | 594.4           | 222.2             | 1.14            | 57.4   | 1.23   | 27.6  | 3.3     |
| B4-7     | 462.5           | 7.9               | 1.01            | 598.4           | 222.2             | 1.15            | 58.2   | 1.25   | 28.0  | 3.3     |
| B4-8     | 465.0           | 7.8               | 1.01            | 602.4           | 222.2             | 1.16            | 59.4   | 1.27   | 28.4  | 3.3     |
| B4-9     | 465.2           | 7.7               | 1.02            | 605.2           | 222.2             | 1.17            | 60.0   | 1.28   | 28.7  | 3.4     |
| B4-10    | 465.7           | 7.7               | 1.02            | 610.4           | 222.2             | 1.18            | 60.8   | 1.30   | 29.0  | 3.4     |

**Çizelge 12.** Tip-5 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.*Table 12. Analysis results of beam models designed as type-5*

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN,m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN,m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B5-0     | 486.9           | 9.4               | 1.00            | 579.1           | 106.3             | 1.00            | 51.8   | 1.00   | 11.3  | 1.0     |
| B5-1     | 488.0           | 9.0               | 1.00            | 614.1           | 222.2             | 1.06            | 54.2   | 1.05   | 24.7  | 2.2     |
| B5-2     | 488.1           | 8.6               | 1.00            | 618.2           | 222.2             | 1.07            | 56.6   | 1.09   | 25.8  | 2.3     |
| B5-3     | 490.2           | 8.4               | 1.01            | 622.0           | 222.2             | 1.07            | 58.6   | 1.13   | 26.6  | 2.4     |
| B5-4     | 490.4           | 8.2               | 1.01            | 626.1           | 222.2             | 1.08            | 59.5   | 1.15   | 27.0  | 2.4     |
| B5-5     | 491.5           | 8.1               | 1.01            | 630.2           | 222.2             | 1.09            | 60.6   | 1.17   | 27.4  | 2.4     |
| B5-6     | 493.1           | 8.0               | 1.01            | 634.5           | 222.2             | 1.10            | 61.6   | 1.19   | 27.8  | 2.5     |
| B5-7     | 493.5           | 7.9               | 1.01            | 638.7           | 222.2             | 1.10            | 62.5   | 1.21   | 28.1  | 2.5     |
| B5-8     | 493.5           | 7.8               | 1.01            | 643.0           | 222.2             | 1.11            | 63.3   | 1.22   | 28.5  | 2.5     |
| B5-9     | 495.2           | 7.7               | 1.02            | 647.1           | 222.2             | 1.12            | 64.1   | 1.24   | 28.8  | 2.5     |
| B5-10    | 498.1           | 7.6               | 1.02            | 651.5           | 222.2             | 1.13            | 65.3   | 1.26   | 29.1  | 2.6     |

**Çizelge 13.** Tip-6 olarak tasarlanan kiriş modellerine ait analiz sonuçları.*Table 13. Analysis results of beam models designed as type-6*

| Kesit No | Akma anında     |                   |                 | Kırılma anında  |                   |                 | $EI_e$ | $EI_o$ | $\mu$ | $\mu_o$ |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------|
|          | $M_y$<br>(kN,m) | $K_y$<br>(Rad/km) | $M_{yi}/M_{y1}$ | $M_u$<br>(kN,m) | $K_u$<br>(Rad/km) | $M_{ui}/M_{u1}$ |        |        |       |         |
| B6-0     | 510.3           | 9.1               | 1.00            | 642.0           | 222.2             | 1.00            | 56.1   | 1.00   | 24.4  | 1.0     |
| B6-1     | 512.9           | 8.8               | 1.01            | 646.0           | 222.2             | 1.01            | 58.6   | 1.04   | 25.4  | 1.1     |
| B6-2     | 513.0           | 8.5               | 1.01            | 650.1           | 222.2             | 1.01            | 60.5   | 1.08   | 26.2  | 1.1     |
| B6-3     | 515.0           | 8.3               | 1.01            | 654.3           | 222.2             | 1.02            | 62.1   | 1.11   | 26.8  | 1.1     |
| B6-4     | 515.3           | 8.2               | 1.01            | 658.6           | 222.2             | 1.03            | 63.0   | 1.12   | 27.1  | 1.1     |
| B6-5     | 516.9           | 8.1               | 1.01            | 663.0           | 222.2             | 1.03            | 64.2   | 1.14   | 27.6  | 1.1     |
| B6-6     | 517.5           | 8.0               | 1.01            | 667.4           | 222.2             | 1.04            | 64.9   | 1.16   | 27.9  | 1.1     |
| B6-7     | 519.8           | 7.9               | 1.02            | 671.9           | 222.2             | 1.05            | 66.2   | 1.18   | 28.3  | 1.2     |
| B6-8     | 520.1           | 7.8               | 1.02            | 676.4           | 222.2             | 1.05            | 66.9   | 1.19   | 28.6  | 1.2     |
| B6-9     | 520.7           | 7.7               | 1.02            | 680.7           | 222.2             | 1.06            | 67.7   | 1.21   | 28.9  | 1.2     |
| B6-10    | 522.2           | 7.6               | 1.02            | 684.3           | 222.2             | 1.07            | 68.7   | 1.22   | 29.2  | 1.2     |

**ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA (RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION)**

Tasarlanan betonarme kiriş kesitlerinin farklı parametrelere göre analiz ve hesap sonuçlarından elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak Çizelge 14, 15, 16, 17, 18 ve 19'da verilmiştir. Farklı parametrelere göre betonarme kiriş modellerinde moment-eğrilik analizlerinden elde edilen akma momenti değerleri Çizelge (14) ve akma eğrilik değerleri Çizelge (15)'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Farklı parametrelere göre betonarme kirişlerde moment-eğrilik analizlerinden elde edilen kırılma momenti değerleri Çizelge (16) ve kırılma anındaki eğrilik değerleri Çizelge (17)'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen  $M_y$  ve  $k_y$  değerlerine göre kesitlerin etkin eğilme rijitlik oranları ( $EI_o$ ) Çizelge (18) ve betonarme kirişlerinin eğrilik süneklik oranları ( $\mu_o$ ) Çizelge (19)'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Betonarme kiriş elemanlarının kesit geometrisi ve karakteristik basınç dayanımlarına göre Denklem (6 ve 7)'e göre kesitlerin çatlamamış eğilme rijitlikleri ( $EI$ ) hesaplanmış ve Çizelge (20)'de verilmiştir. Betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkilerine göre Denklem (5) ile etkin rijitlik ( $EI_e$ ) değerleri ve Denklem (6 ve 7) ile hesaplanan çatlamamış kesitin eğilme rijitliklerine ( $EI$ ) göre hesaplanan etkin rijitlik çarpanları ( $k_e$ ) Çizelge (21)'de ve karşılaştırmalı grafiği Şekil (8)'de verilmiştir.

**Çizelge 14.** Kiriş modellerinde analizlerden elde edilen akma momenti değerlerinin karşılaştırılması.*Table 14. Comparison of yield moment values obtained from analysis results in beam models*

| Kesit No | $M_y$ | Kesit No | $M_y$ | Kesit No | $M_y$ | Kesit No | $M_y$ | Kesit No | $M_y$ | Kesit No | $M_y$ |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| B1-0     | 312.2 | B2-0     | 362.3 | B3-0     | 406.7 | B4-0     | 458.3 | B5-0     | 486.9 | B6-0     | 510.3 |
| B1-1     | 324.9 | B2-1     | 367.5 | B3-1     | 406.8 | B4-1     | 459.2 | B5-1     | 488.0 | B6-1     | 512.9 |
| B1-2     | 325.6 | B2-2     | 367.6 | B3-2     | 407.8 | B4-2     | 460.1 | B5-2     | 488.1 | B6-2     | 513.0 |
| B1-3     | 326.0 | B2-3     | 368.6 | B3-3     | 408.0 | B4-3     | 460.7 | B5-3     | 490.2 | B6-3     | 515.0 |
| B1-4     | 326.5 | B2-4     | 368.7 | B3-4     | 408.4 | B4-4     | 460.7 | B5-4     | 490.4 | B6-4     | 515.3 |
| B1-5     | 326.5 | B2-5     | 369.1 | B3-5     | 409.3 | B4-5     | 461.2 | B5-5     | 491.5 | B6-5     | 516.9 |
| B1-6     | 326.7 | B2-6     | 370.3 | B3-6     | 409.5 | B4-6     | 461.9 | B5-6     | 493.1 | B6-6     | 517.5 |
| B1-7     | 327.1 | B2-7     | 371.0 | B3-7     | 410.2 | B4-7     | 462.5 | B5-7     | 493.5 | B6-7     | 519.8 |
| B1-8     | 328.1 | B2-8     | 372.0 | B3-8     | 410.7 | B4-8     | 465.0 | B5-8     | 493.5 | B6-8     | 520.1 |
| B1-9     | 328.3 | B2-9     | 372.7 | B3-9     | 411.5 | B4-9     | 465.2 | B5-9     | 495.2 | B6-9     | 520.7 |
| B1-10    | 329.1 | B2-10    | 373.0 | B3-10    | 414.2 | B4-10    | 465.7 | B5-10    | 498.1 | B6-10    | 522.2 |

**Çizelge 15.** Kiriş modellerinde analizlerden elde edilen akma eğriliği değerlerinin karşılaştırılması.*Table 15. Comparison of yield curvature values obtained from analysis results in beam models*

| Kesit No | $K_y$ | Kesit No | $K_y$ | Kesit No | $K_y$ | Kesit No | $K_y$ | Kesit No | $K_y$ | Kesit No | $K_y$ |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| B1-0     | 10.3  | B2-0     | 10.1  | B3-0     | 9.9   | B4-0     | 9.8   | B5-0     | 9.4   | B6-0     | 9.1   |
| B1-1     | 10.0  | B2-1     | 9.6   | B3-1     | 9.3   | B4-1     | 9.3   | B5-1     | 9.0   | B6-1     | 8.8   |
| B1-2     | 9.4   | B2-2     | 9.0   | B3-2     | 8.8   | B4-2     | 8.8   | B5-2     | 8.6   | B6-2     | 8.5   |
| B1-3     | 8.8   | B2-3     | 8.6   | B3-3     | 8.5   | B4-3     | 8.5   | B5-3     | 8.4   | B6-3     | 8.3   |
| B1-4     | 8.4   | B2-4     | 8.3   | B3-4     | 8.3   | B4-4     | 8.3   | B5-4     | 8.2   | B6-4     | 8.2   |
| B1-5     | 8.3   | B2-5     | 8.2   | B3-5     | 8.1   | B4-5     | 8.2   | B5-5     | 8.1   | B6-5     | 8.1   |
| B1-6     | 8.1   | B2-6     | 8.1   | B3-6     | 8.0   | B4-6     | 8.0   | B5-6     | 8.0   | B6-6     | 8.0   |
| B1-7     | 8.0   | B2-7     | 8.0   | B3-7     | 7.9   | B4-7     | 7.9   | B5-7     | 7.9   | B6-7     | 7.9   |
| B1-8     | 7.9   | B2-8     | 7.8   | B3-8     | 7.8   | B4-8     | 7.8   | B5-8     | 7.8   | B6-8     | 7.8   |
| B1-9     | 7.8   | B2-9     | 7.7   | B3-9     | 7.7   | B4-9     | 7.7   | B5-9     | 7.7   | B6-9     | 7.7   |
| B1-10    | 7.7   | B2-10    | 7.6   | B3-10    | 7.6   | B4-10    | 7.7   | B5-10    | 7.6   | B6-10    | 7.6   |

**Çizelge 16.** Kiriş modelleri analizlerden elde edilen maksimum momenti değerlerinin karşılaştırılması.*Table 16. Comparison of ultimate moment values obtained from analysis results in beam models*

| Kesit No | $M_u$ | Kesit No | $M_u$ | Kesit No | $M_u$ | Kesit No | $M_u$ | Kesit No | $M_u$ | Kesit No | $M_u$ |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| B1-0     | 324.0 | B2-0     | 366.8 | B3-0     | 454.2 | B4-0     | 519.4 | B5-0     | 579.1 | B6-0     | 642.0 |
| B1-1     | 355.1 | B2-1     | 425.1 | B3-1     | 490.4 | B4-1     | 558.4 | B5-1     | 614.1 | B6-1     | 646.0 |
| B1-2     | 388.0 | B2-2     | 462.0 | B3-2     | 512.5 | B4-2     | 579.1 | B5-2     | 618.2 | B6-2     | 650.1 |
| B1-3     | 409.6 | B2-3     | 465.1 | B3-3     | 515.7 | B4-3     | 582.7 | B5-3     | 622.0 | B6-3     | 654.3 |
| B1-4     | 412.2 | B2-4     | 468.1 | B3-4     | 519.2 | B4-4     | 586.6 | B5-4     | 626.1 | B6-4     | 658.6 |
| B1-5     | 415.0 | B2-5     | 471.2 | B3-5     | 522.7 | B4-5     | 590.5 | B5-5     | 630.2 | B6-5     | 663.0 |
| B1-6     | 417.8 | B2-6     | 474.3 | B3-6     | 526.2 | B4-6     | 594.4 | B5-6     | 634.5 | B6-6     | 667.4 |
| B1-7     | 419.8 | B2-7     | 477.0 | B3-7     | 529.6 | B4-7     | 598.4 | B5-7     | 638.7 | B6-7     | 671.9 |
| B1-8     | 423.2 | B2-8     | 478.9 | B3-8     | 533.0 | B4-8     | 602.4 | B5-8     | 643.0 | B6-8     | 676.4 |
| B1-9     | 426.1 | B2-9     | 480.8 | B3-9     | 536.6 | B4-9     | 605.2 | B5-9     | 647.1 | B6-9     | 680.7 |
| B1-10    | 428.9 | B2-10    | 487.0 | B3-10    | 540.3 | B4-10    | 610.4 | B5-10    | 651.5 | B6-10    | 684.3 |

**Çizelge 17.** Kiriş modelleri analizlerinden elde edilen maksimum eğrilik değerlerinin karşılaştırılması.*Table 17. Comparison of ultimate curvature values obtained from analysis results in beam models*

| Kesit No | $K_u$ | Kesit No | $K_u$ | Kesit No | $K_u$ | Kesit No | $K_u$ | Kesit No | $K_u$ | Kesit No | $K_u$ |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| B1-0     | 38.4  | B2-0     | 58.0  | B3-0     | 77.0  | B4-0     | 83.3  | B5-0     | 106.3 | B6-0     | 222.2 |
| B1-1     | 65.2  | B2-1     | 93.2  | B3-1     | 114.5 | B4-1     | 136.1 | B5-1     | 222.2 | B6-1     | 222.2 |
| B1-2     | 109.0 | B2-2     | 222.2 | B3-2     | 222.2 | B4-2     | 222.2 | B5-2     | 222.2 | B6-2     | 222.2 |
| B1-3     | 222.2 | B2-3     | 222.2 | B3-3     | 222.2 | B4-3     | 222.2 | B5-3     | 222.2 | B6-3     | 222.2 |
| B1-4     | 222.2 | B2-4     | 222.2 | B3-4     | 222.2 | B4-4     | 222.2 | B5-4     | 222.2 | B6-4     | 222.2 |
| B1-5     | 222.2 | B2-5     | 222.2 | B3-5     | 222.2 | B4-5     | 222.2 | B5-5     | 222.2 | B6-5     | 222.2 |
| B1-6     | 222.2 | B2-6     | 222.2 | B3-6     | 222.2 | B4-6     | 222.2 | B5-6     | 222.2 | B6-6     | 222.2 |
| B1-7     | 222.2 | B2-7     | 222.2 | B3-7     | 222.2 | B4-7     | 222.2 | B5-7     | 222.2 | B6-7     | 222.2 |
| B1-8     | 222.2 | B2-8     | 222.2 | B3-8     | 222.2 | B4-8     | 222.2 | B5-8     | 222.2 | B6-8     | 222.2 |
| B1-9     | 222.2 | B2-9     | 222.2 | B3-9     | 222.2 | B4-9     | 222.2 | B5-9     | 222.2 | B6-9     | 222.2 |
| B1-10    | 222.2 | B2-10    | 222.2 | B3-10    | 222.2 | B4-10    | 222.2 | B5-10    | 222.2 | B6-10    | 222.2 |

**Çizelge 18.** Kiriş modelleri analizlerinden elde edilen rijitlik oranlarının ( $EI_o$ ) karşılaştırılması.*Table 18. Comparison of stiffness ratios ( $EI_o$ ) obtained from beam model analysis*

| Kesit No | $EI_o$ | Kesit No | $EI_o$ | Kesit No | $EI_o$ | Kesit No | $EI_o$ | Kesit No | $EI_o$ | Kesit No | $EI_o$ |
|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| B1-0     | 1.00   | B2-0     | 1.00   | B3-0     | 1.00   | B4-0     | 1.00   | B5-0     | 1.00   | B6-0     | 1.00   |
| B1-1     | 1.07   | B2-1     | 1.06   | B3-1     | 1.06   | B4-1     | 1.06   | B5-1     | 1.05   | B6-1     | 1.04   |
| B1-2     | 1.14   | B2-2     | 1.13   | B3-2     | 1.13   | B4-2     | 1.12   | B5-2     | 1.09   | B6-2     | 1.08   |
| B1-3     | 1.22   | B2-3     | 1.20   | B3-3     | 1.17   | B4-3     | 1.16   | B5-3     | 1.13   | B6-3     | 1.11   |
| B1-4     | 1.28   | B2-4     | 1.24   | B3-4     | 1.20   | B4-4     | 1.19   | B5-4     | 1.15   | B6-4     | 1.12   |
| B1-5     | 1.30   | B2-5     | 1.25   | B3-5     | 1.22   | B4-5     | 1.21   | B5-5     | 1.17   | B6-5     | 1.14   |
| B1-6     | 1.33   | B2-6     | 1.28   | B3-6     | 1.24   | B4-6     | 1.23   | B5-6     | 1.19   | B6-6     | 1.16   |
| B1-7     | 1.35   | B2-7     | 1.30   | B3-7     | 1.26   | B4-7     | 1.25   | B5-7     | 1.21   | B6-7     | 1.18   |
| B1-8     | 1.38   | B2-8     | 1.32   | B3-8     | 1.28   | B4-8     | 1.27   | B5-8     | 1.22   | B6-8     | 1.19   |
| B1-9     | 1.39   | B2-9     | 1.34   | B3-9     | 1.29   | B4-9     | 1.28   | B5-9     | 1.24   | B6-9     | 1.21   |
| B1-10    | 1.41   | B2-10    | 1.36   | B3-10    | 1.32   | B4-10    | 1.30   | B5-10    | 1.26   | B6-10    | 1.22   |

**Çizelge 19.** Kiriş modelleri analizlerinden elde edilen süneklik oranlarının ( $\mu_o$ ) karşılaştırılması.*Table 19. Comparison of ductility ratios ( $\mu_o$ ) obtained from beam model analysis*

| Kesit No | $\mu_o$ | Kesit No | $\mu_o$ | Kesit No | $\mu_o$ | Kesit No | $\mu_o$ | Kesit No | $\mu_o$ | Kesit No | $\mu_o$ |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| B1-0     | 1.0     | B2-0     | 1.0     | B3-0     | 1.0     | B4-0     | 1.0     | B5-0     | 1.0     | B6-0     | 1.0     |
| B1-1     | 1.8     | B2-1     | 1.7     | B3-1     | 1.6     | B4-1     | 1.7     | B5-1     | 2.2     | B6-1     | 1.0     |
| B1-2     | 3.1     | B2-2     | 4.3     | B3-2     | 3.2     | B4-2     | 3.0     | B5-2     | 2.3     | B6-2     | 1.1     |
| B1-3     | 6.8     | B2-3     | 4.5     | B3-3     | 3.4     | B4-3     | 3.1     | B5-3     | 2.4     | B6-3     | 1.1     |
| B1-4     | 7.1     | B2-4     | 4.7     | B3-4     | 3.5     | B4-4     | 3.2     | B5-4     | 2.4     | B6-4     | 1.1     |
| B1-5     | 7.2     | B2-5     | 4.7     | B3-5     | 3.5     | B4-5     | 3.2     | B5-5     | 2.4     | B6-5     | 1.1     |
| B1-6     | 7.4     | B2-6     | 4.8     | B3-6     | 3.6     | B4-6     | 3.3     | B5-6     | 2.5     | B6-6     | 1.1     |
| B1-7     | 7.5     | B2-7     | 4.9     | B3-7     | 3.6     | B4-7     | 3.3     | B5-7     | 2.5     | B6-7     | 1.2     |
| B1-8     | 7.6     | B2-8     | 4.9     | B3-8     | 3.7     | B4-8     | 3.3     | B5-8     | 2.5     | B6-8     | 1.2     |
| B1-9     | 7.7     | B2-9     | 5.0     | B3-9     | 3.7     | B4-9     | 3.4     | B5-9     | 2.5     | B6-9     | 1.2     |
| B1-10    | 7.8     | B2-10    | 5.1     | B3-10    | 3.7     | B4-10    | 3.4     | B5-10    | 2.6     | B6-10    | 1.2     |

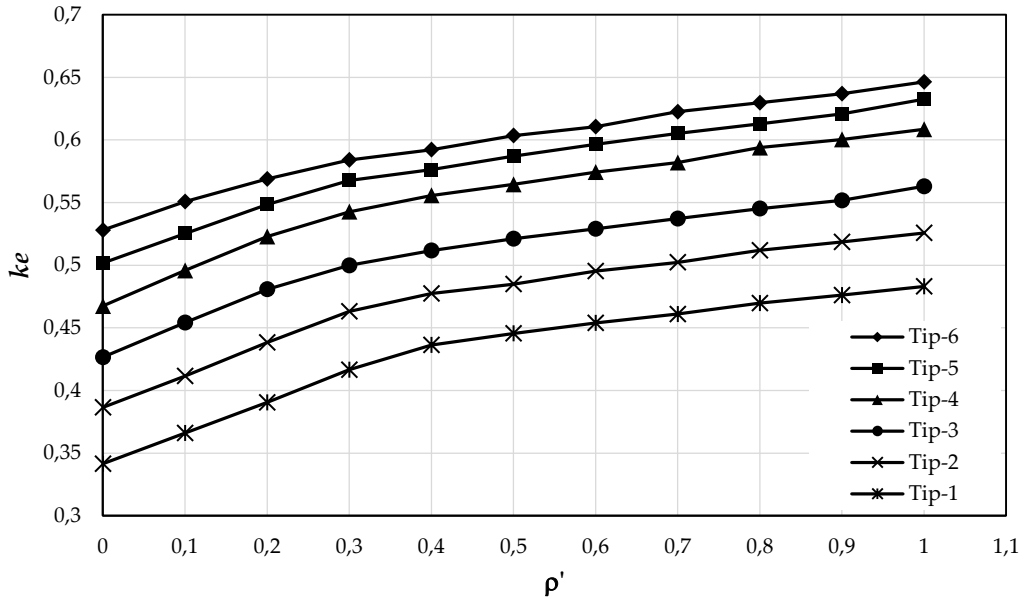
**Çizelge 20.** Betonarme kiriş elemanlarının çatlamamış eğilme rijitliği ( $EI$ ).*Table 20. flexural bending stiffness ( $EI$ ) of reinforced concrete beam elements*

| Beton Sınıfı | $E_c$ (MPa) | b (m) | h (m) | I (m <sup>4</sup> ) | $EI$ (kNxm <sup>2</sup> ) |
|--------------|-------------|-------|-------|---------------------|---------------------------|
| 25           | 30250.0     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 88776.04                  |
| 30           | 31801.0     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 92815.06                  |
| 35           | 33227.3     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 96529.32                  |
| 40           | 34554.8     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 99986.47                  |
| 45           | 35801.7     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 103233.50                 |
| 50           | 36981.0     | 0.25  | 0.5   | 0.0026042           | 106304.61                 |

**Çizelge 21.** Betonarme kiriş elemanlarının etkin rijitlik katsayıları ( $k_e$ ).*Table 21. effective stiffness coefficients ( $k_e$ ) of reinforced concrete beam elements*

| $\rho'$ | Kesit No | $k_e$ | Kesit No | $k_e$ | Kesit No | $k_e$ | Kesit No | $k_e$ | Kesit No | $k_e$ | Kesit No | $k_e$ |
|---------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| 0       | B1-0     | 0.34  | B2-0     | 0.39  | B3-0     | 0.43  | B4-0     | 0.47  | B5-0     | 0.50  | B6-0     | 0.53  |
| 0,1     | B1-1     | 0.37  | B2-1     | 0.41  | B3-1     | 0.45  | B4-1     | 0.50  | B5-1     | 0.53  | B6-1     | 0.55  |
| 0,2     | B1-2     | 0.39  | B2-2     | 0.44  | B3-2     | 0.48  | B4-2     | 0.52  | B5-2     | 0.55  | B6-2     | 0.57  |
| 0,3     | B1-3     | 0.42  | B2-3     | 0.46  | B3-3     | 0.50  | B4-3     | 0.54  | B5-3     | 0.57  | B6-3     | 0.58  |
| 0,4     | B1-4     | 0.44  | B2-4     | 0.48  | B3-4     | 0.51  | B4-4     | 0.56  | B5-4     | 0.58  | B6-4     | 0.59  |
| 0,5     | B1-5     | 0.45  | B2-5     | 0.48  | B3-5     | 0.52  | B4-5     | 0.56  | B5-5     | 0.59  | B6-5     | 0.60  |
| 0,6     | B1-6     | 0.45  | B2-6     | 0.50  | B3-6     | 0.53  | B4-6     | 0.57  | B5-6     | 0.60  | B6-6     | 0.61  |
| 0,7     | B1-7     | 0.46  | B2-7     | 0.50  | B3-7     | 0.54  | B4-7     | 0.58  | B5-7     | 0.61  | B6-7     | 0.62  |
| 0,8     | B1-8     | 0.47  | B2-8     | 0.51  | B3-8     | 0.55  | B4-8     | 0.59  | B5-8     | 0.61  | B6-8     | 0.63  |
| 0,9     | B1-9     | 0.48  | B2-9     | 0.52  | B3-9     | 0.55  | B4-9     | 0.60  | B5-9     | 0.62  | B6-9     | 0.64  |
| 1       | B1-10    | 0.48  | B2-10    | 0.53  | B3-10    | 0.56  | B4-10    | 0.61  | B5-10    | 0.63  | B6-10    | 0.65  |

$k_e$ ; Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Etkin Kesit Rijitlik Katsayısı



**Şekil 8.** Betonarme kiriş elemanlarının farklı tip modellerine göre etkin eğilme rijitlik çarpanlarının karşılaştırılmalı grafiği.

*Figure 8. Comparison curves of effective stiffness coefficients according to different types of reinforced concrete beam elements*

## SONUÇ (DISCUSSIONS)

Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümünde özetlenen sonuçların ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen  $M_y$ ,  $M_u$  ve  $k_u$  değerleri artmakta fakat  $k_y$  değerleri azalmaktadır. Basınç donatı oranının artması ile kesitlerin maksimum moment taşıma kapasitesi ve sünekliği artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile  $M_y$  ve  $M_u$  değerleri artmakta,  $k_y$  ve  $k_u$  değerleri;  $\rho' = 0.40\rho$  oranına kadar azalmakta ve  $\rho' = 0.50\rho$  oranından  $\rho' = \rho$  oranına kadar sabit kalmaktadır. Beton basınç dayanımının artması maksimum moment kapasitesini artırmaktadır.
- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatısı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen  $EI_o$  değerleri artmaktadır. Basınç donatısı oranının artması ile kesitlerin eğilme rijitliği artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile hesaplanan  $EI_o$  değerleri azalmaktadır.
- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için basınç donatı oranının artması ile moment-eğrilik ilişkilerinden elde edilen değerlere göre hesaplanan  $\mu_o$  değerleri artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile  $\mu_o$  değerleri;  $\rho' = 0.40\rho$  oranına kadar artmakta ve  $\rho' = 0.50\rho$  oranından  $\rho' = \rho$  oranına kadar azalmaktadır.
- Betonarme kirişlerde sabit beton basınç dayanımı ve çekme donatısı oranı için, basınç donatı oranının artması ile  $k_e$  değerleri artmaktadır.
- Sabit basınç donatısı ve çekme donatısı oranına sahip betonarme kirişlerde beton basınç dayanımının artması ile  $k_e$  değerleri artmaktadır.
- Basınç donatısı oranının betonarme kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesi, etkin eğilme rijitliği, sünekliği ve kesitlerin etkin eğilme rijitliliği üzerinde etkili olduğu ispatlanmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Canbay, E., Ersoy, U., Özcebe, G., Sucuoğlu, H., Wasti, S. T., 2010. *Binalar İçin Deprem Mühendisliği Temel İlkeler*, ISBN: 9799789944070, ODTÜ, Akademik Kitaplar Yayınevi, Ankara.
- Çağlar, N., Akkaya, A., Demir, A., Öztürk, H., 2004. Farklı Kesit Geometrilerine Sahip Betonarme Kolonların Davranışının İncelenmesi, *ISITES2014*, p. 2095-2105, Karabük/Türkiye.
- Ersoy, U., Özcebe, G., 2012, *Betonarme 1*, ISBN: 978-975-503-215-31, Evrim Yayınevi ve Bilgisayar San. Tic. Ltd. Şti, İstanbul.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R., 1988a. "Theoretical stress-strain model for confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp.1804-1826.
- SAP2000, Structural Software for Analysis and Design, *Computers and Structures, Inc*, Version 20.2.0.0 USA.
- TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- TS500, 2000, *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standardları Enstitüsü, TSE, Ankara.



## ESNEK ZAMAN PENCERELİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ İÇİN ÖNCE KÜMELE-SONRA ROTALA TEMELLİ BİR YÖNTEM ÖNERİSİ; BİR SÜPERMARKET ÖRNEĞİ

<sup>1</sup>Serap ERCAN CÖMERT , <sup>2</sup>Harun Reşit YAZGAN , <sup>3</sup>Büşra ÇAKIR, <sup>4</sup>Nazan SARI

Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>serape@sakarya.edu.tr, <sup>2</sup>yazgan@sakarya.edu.tr, <sup>3</sup>busra.cakir6@ogr.sakarya.edu.tr,  
<sup>4</sup>nazansarii42@gmail.com

(Geliş/Received: 01.10.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.06.2019)

**ÖZ:** Esnek zaman pencereli araç rotalama problemi, belirli zaman aralıklarında servis görmek isteyen müşterilere, erken ya da geç hizmet verilmesine ceza maliyeti uygulanması koşuluyla izin veren zaman pencereli araç rotalama probleminin bir çeşididir. Bu çalışmada, ele alınan esnek zaman pencereli araç rotalama problemi için önce kümele-sonra rotala yöntemine dayalı bir yöntem önerilmiştir. İlk olarak müşteriler K-Means ve K-Medoids kümeleme algoritmalarına göre kümelenebilir, daha sonra ise karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli yardımıyla rotalanmıştır. Son olarak, algoritmaların etkinliğini göstermek için ANOVA testi kullanılmış ve deneysel sonuçlar, algoritmalar ile elde edilen sonuçların firmanın gerçek maliyetleri ile karşılaştırıldığında daha iyi olduğunu göstermektedir.

**Anahtar kelimeler:** Esnek Zaman Pencereli Araç Rotalama Problemi, K-Means Algoritması, K-Medoids Algoritması

### Cluster-First Route-Second Approach For The Solution Of Vehicle Routing Problem With Soft Time Windows; A Supermarket Chain Application

**ABSTRACT:** The vehicle routing problem with soft time windows is a type of vehicle routing problem with time windows which allow to serve customers outside their time windows, but the penalty costs is applied for the company for early or late service. In this study, an approach consisted of two stages as "cluster-first route-second" is proposed for the vehicle routing problem with soft time windows. Firstly, customers are clustered according to K-Means and K-Medoids clustering algorithms, then routed by the help of mixed integer linear programming model. Finally, the ANOVA test is used to show the effectiveness of the algorithms and the experimental results showed that the results obtained with the algorithms provides a better solution than the actual costs of the firm.

**Key Words:** Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows, K-Means Algorithm, K-Medoids Algorithm

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hem küresel hem de yerel pazarlarda yoğun bir rekabet bulunmaktadır. Rekabet ortamında işletmelerin müşterilerine daha iyi bir hizmet verebilmesi için iyi bir planlama yapılması ve güncel teknolojik gelişmelerin takip edilmesi gerekmektedir. İşletmeler, yoğun rekabetin olduğu bu müşteri odaklı pazarlarda varlıklarını koruyabilmek ve rekabet ile mücadele edebilmek için kalitelerini arttırırken maliyetlerini azaltmak zorundadırlar. İşletmelerin toplam maliyetleri



içerisinde önemli bir paya sahip olan dağıtım maliyetleri azaltılırken aynı zamanda firmaların müşterilerine en kısa sürede hizmet vermeleri gerekmektedir. Bu nedenle dağıtım maliyetlerini azaltan, aracın kat ettiği toplam mesafeyi ya da süreyi en küçükleyen ve araçların en uygun rotalarının bulunmasını sağlayan amaçlar araç rotalama probleminin (ARP) temel konuları içerisine girmektedir.

İlk kez Dantzig ve Ramser tarafından tanımlanan ARP; merkezi bir depoda bulunan aynı veya farklı kapasitelere sahip olan araçların, her biri farklı konuma ve talebe sahip olan müşteriler kümesine toplam seyahat mesafesini veya süresini en aza indirecek şekilde hizmet vererek depoya geri dönmesi için gerekli rotaların belirlenmesi problemi olarak tanımlanabilir (Toth ve Vigo, 2002a). ARP'nin sahip olduğu kısıtlara göre farklı çeşitleri vardır. Her müşteri için araç veya araçların hizmete başlayacağı en erken ve en geç zaman kısıtlarını içeren zaman pencereli araç rotalama problemi (ZPARP) bunlardan biridir. ZPARP'nin amacı, müşteri talepleri yine müşterilerin arzu ettikleri zaman aralıkları dikkate alınarak dağıtım rotalarının oluşturulmasıdır. Esnek ve sıkı zaman pencereli araç rotalama problemi ZPARP'nin farklı türleri olup, bu çalışmada esnek zaman pencereli araç rotalama problemi (EZPARP) ele alınmıştır.

Araç rotalama problemlerini çözmek için literatürde pek çok yöntem geliştirilmiştir. Yöntemlerden biri kesin çözüm yöntemleridir. Literatürde en iyi bilinen kesin çözüm yöntemleri; dal ve sınır yöntemi, dal ve kesme yöntemi, kesme düzlemi yöntemi ve dinamik programlamadır. Bu yöntemlerin performansı, araç rotalama problemleri NP-zor problem sınıfa girdiği için problemin boyutuna bağlıdır. Çözüm yöntemlerinden bir diğeri ise sezgisel yöntemlerdir. Sezgisel yöntemler; klasik sezgisel yöntemler ve meta-sezgisel yöntemler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Klasik sezgisel yöntemler olurlu çözümü daha kısa sürede bulabilmekte, fakat bulunan bu çözüm yerel en iyi değerleri içermektedir. Yapısal sezgisel yöntemler, iki-aşamalı sezgisel yöntemler ve geliştirici sezgisel yöntemler klasik sezgisel yöntemlere örnek olarak verilebilir. Meta-sezgisel yöntemler de en iyi çözüme yakın çözümleri bulabilme kabiliyetine sahiptirler. Ayrıca meta-sezgisel yöntemler çözüm uzayını tararken yerel en iyi değerlerden kurtulabilmektedirler. Genetik algoritma, karınca kolonisi algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, tabu arama algoritması ve tavlama benzetimi meta sezgisel yöntemlere örnek olarak verilebilir (Toth ve Vigo, 2002b).

Araç rotalama problemi NP-zor problem sınıfına girmekte, bu nedenle de problemi çözmek için gereken hesaplama süresi problemin boyutuyla birlikte üstel olarak artmaktadır. Bundan dolayı literatürde var olan kesin çözüm yöntemleri sadece küçük boyutlu problemleri çözebilmektedirler. Belirli sayıda müşterinin ve kısıtın olduğu gerçek hayat problemlerinde bu yöntemler en iyi çözüme ulaşma zaman almakta veya imkansız olmaktadır. Bu nedenle ele alınan çalışmada büyük boyutlu problemlerin makul sürelerde çözümüne olanak sağlamak için kümeleme analizi kullanılarak problemin boyutu küçültülmüş ve sonrasında kesin çözüm yönteminin kullanımına olanak sağlanmıştır.

Kümeleme analizi, verileri benzerliklerine göre gruplara ayırarak sınıflandırılmasını sağlayan çok değişkenli bir istatistiksel analiz yöntemidir (Kaufman ve Rousseuw, 1990). Kümeleme analizinin amacı, gruplandırılmamış verileri benzer özelliklerine göre sınıflandırmak ve araştırmacıya işe yarar özetleyici bilgiler sunmaktır. Yapılan kümeleme işleminin başarısı, kümeler arasındaki benzerliğin az, kümelerin kendi içerisindeki benzerliğin ise fazla olmasıyla ölçülmektedir (Hair ve diğ., 1995).

Bu çalışmada 78 şubeye sahip bir süpermarket zincirinin ana depodan çıkan araçların şube taleplerinin belirli zaman aralıklarında karşılanabilmesi için uygun araç rotalarının belirlenmesi probleminin çözümü için önce kümele-sonra rotala yöntemine dayalı bir yöntem önerilmiştir. Çalışmanın geriye kalan kısmı ise şöyledir; ikinci bölümde literatür araştırmasına yer verilmiş, üçüncü bölümde ele alınan problemin tanımı ve formülasyonu yapılmış ve dördüncü bölümde önerilen çözüm yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise uygulama kısmına yer verilmiştir. Son olarak çalışmadan elde edilen bulgular sonuç kısmında özetlenmiştir.

## LİTERATÜR ARAŞTIRMASI(LITERATURE REVIEW)

Bu çalışmada EZPARP'nin çözümü için önce kümele-sonra rotala temelli iki aşamalı bir çözüm yöntemi önerilmiştir. İlk aşamada, kümeleme problemi kümeleme analizi yöntemlerinden K-Means ve K-Medoids algoritması kullanılarak çözülmüştür. İkinci aşamada ise rotalama problemi kesin çözüm yöntemlerinden tam sayılı doğrusal programlama modeli yardımıyla çözülmüştür. Bu nedenle literatür araştırmamız ARP'nin çözümünde kümeleme analizinin kullanıldığı çalışmalar ve EZPARP'nin çözümünde kesin çözüm yönteminin kullanıldığı çalışmalar ile sınırlandırılmıştır.

İlk olarak, ARP'nin çözümünde kümeleme analizi yöntemlerinin kullanıldığı literatürde çalışmalar incelendiğinde, Thangiah ve Salhi (2001)'nin birden çok depoya sahip araç rotalama problemi için genetik algoritmaya dayanan geliştirilmiş bir kümeleme yöntemi önerdikleri görülmektedir. Literatürdeki test problemleri kullanılarak önerilen yöntemin etkinliği değerlendirilmiştir. Önerilen kümeleme yöntemi, literatürdeki 23 problemde 11 tanesi için yeni en iyi çözümü bulmuştur. Crainic ve diğ. (2008) iki aşamalı araç rotalama problemini ele almışlardır. İki aşamalı araç rotalama problemi, klasik araç rotalama probleminin bir uzantısı olup tek bir depodan müşteriye teslimatın uydular olarak adlandırılan menzil ara bölge deposuna yönlendirilmesi ile gerçekleştirilmesi olarak adlandırılır. Ele alınan problemin çözümü için kümeleme temelli meta-sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar kümeleme temelli yöntemin iyi performans gösterdiğini ve bu iki aşamalı sistemin maliyetlerde iyileştirme sağladığını göstermiştir. Nallusamy ve diğ. (2010) çalışmalarında, çoklu gezgin satıcı problemini basit gezgin satıcı problemine dönüştürmek için kümeleme analizi yöntemlerinden K-Means algoritmasını kullanmışlardır. Kümeleme işleminden sonra ise tabu arama ve benzetimli tavlama yöntemlerini kullanarak gezgin satıcı probleminin çözümünü yapmışlar ve elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Çalışkan (2011) çok depolu ARP'nin çözümünde karınca kolonisi ile kümeleme algoritmalarını birlikte kullanmış ve toplam maliyeti en aza indirmeyi hedeflemiştir. Yücenur ve Demirel (2011) çalışmalarında çok depolu araç rotalama probleminin çözümü için iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Yöntemin birinci aşamasında, Thangiah ve Salhi (2001)'nin geliştirdiği genetik algoritma tabanlı kümeleme yöntemi kullanılarak kümeleme işlemi yapılmış, ikinci aşamasında ise karınca kolonisi optimizasyonu ile rotalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ortaya koydukları melez yöntemin performansını test problemleri üzerinde değerlendirmişlerdir. Şen (2014) kapasite kısıtlı ARP'nin çözümü için kümeleme analizi yöntemlerini GA ile destekleyerek yeni bir yaklaşım geliştirmiş ve geliştirdiği yaklaşımının geçerliliğini perakende sektöründe bir örnek olay üzerinde test etmiştir. Bozyer ve diğ. (2014) kapasite kısıtlı ARP'nin çözümü için gruplama aşamasında kümeleme analizi tekniklerinden C-means algoritmasının kullanıldığı, önce kümele sonra rotala yöntemini önermişlerdir. Cömert ve diğ. (2018) sıkı zaman pencereli ARP'nin çözümü için kümeleme analizi tabanlı iki aşamalı bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemin geçerliliği bir örnek olay üzerinde gösterilmiştir. Ünsal ve diğ. (2018), ARP'nin bir alt dalı olan okul servisi rotalama probleminin optimizasyonu için yapay zekâ ve kümeleme analizi teknikleri kullanılarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirilen yöntem Ankara ilindeki bir okula taşımacılık hizmeti veren servis firmasından toplanan rota verileri üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçların mevcut değerlerden daha iyi olduğu iddia edilmiştir.

EZPARP literatürde ilk kez Sexton ve Choi (1986) tarafından çalışılmıştır. Sexton ve Choi (1986), çalışmalarında hem toplama hem de dağıtım işlemleri yapılmaktadır. Zaman pencerelerinin sağlanamadığı durumlarda ortaya çıkan toplam müşteri cezalarını en aza indirmek için Bender ayrıştırma yöntemini uygulamışlardır. Min (1991), EZPARP için toplam seyahat zamanını ve zaman penceresinden sapmaları en aza indirmeyi amaçlayan çok amaçlı bir matematiksel model önermiştir. Önerdiği modelin etkinliği kütüphane dağıtım sisteminde denermiştir. Fagerhalt (2001), esnek zaman pencereli çok gemili toplama ve dağıtım problemini ele almıştır. Taşıma maliyetini ve zaman pencerelerinin dışında hizmet verildiğinde ortaya çıkan ceza maliyetini en aza indirmeyi amaçlayan küme ayrıştırma formülasyonu tabanlı bir optimizasyon yöntemi önermiştir. Aydemir (2006), EZPARP'nin çözümü için çok amaçlı bir matematiksel model önermiştir. Önerdiği modelin

üç adet amaç fonksiyonu bulunmaktadır ve model tam zamanında üretim sistemi uygulayan büyük bir otomotiv fabrikasının tedarikçilerden malzeme almak için kullanılan araçların rotalanmasında uygulanmıştır. Calvete ve diğ. (2007), çalışmalarında, EZPARP'nin çözümü için hedef programlama yaklaşımını kullanarak bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen modeli çözmek için, önce uzun yolları hesaplayan ve ardından en iyi olanları seçen bir sıralama-takip-optimizasyon yaklaşımı önerilmiştir. Deneysel hesaplamalar bu yaklaşımın orta ölçekli problemler için yeterli olduğunu göstermektedir. Qureshi ve diğ. (2009), esnek zaman pencere araç rotalama ve çizelgeleme problemini ele almışlardır. Ele aldıkları problemin çözümü için sütun üretme temelli bir optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Önerdikleri yaklaşımın etkinliğini Solomon'un test problemleri üzerinde denemişlerdir. Qureshi ve diğ. (2010), bu çalışmalarında araçların müşterilere erken varışlarında beklenmekte, sadece geç varışlarında cezanın tahsil edildiği EZPARP'nin bir çeşidi olan yarı esnek zaman pencere araç rotalama problemi çalışmışlardır. Ele aldıkları problemin çözümü için de bir önceki çalışmalarında olduğu gibi sütun üretme temelli bir optimizasyon yaklaşımı sunmuşlardır. Taş ve diğ. (2014), çalışmalarında stokastik seyahat sürelerine sahip EZPARP'yi ele almışlardır. Problemde, hem etkili hem de güvenilir olan rotalar elde etmek için stokastik seyahat süreleri dikkate alınmıştır. Ele alınan problemin çözümü için sütun üretme yaklaşımını kullanmışlardır. Chiong ve Chong (2017), EZPARP'de bu zamana kadar çalışılmamış durum olan performans bonusu dikkate alınarak matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu matematiksel model sadece performans bonusunu EZPARP'de dikkate almakla kalmaz, aynı zamanda her bir personel arasındaki yük dengesini oluşturmayı sağlamaktadır.

EZPARP'de klasik ARP gibi NP-zor problem sınıfına girdiği için problemin kısıt ve değişken sayısı arttığında kesin çözüm yöntemleri kullanılarak çözülmesi zor hatta imkânsız hale gelmektedir. Bu nedenle çalışmamızın amacı, orta ve büyük boyutlu örnekleri makul sürelerde çözmek için kullanılabilir önce kümele-sonra rotala yöntemine dayalı bir iki aşamalı çözüm yaklaşımı önerilmektedir. Önerilen çözüm yöntemi müşterileri kümeleyerek problemin boyutunu küçültmekte ve kesin çözüm yöntemi kullanılarak çözülmesine olanak sağlamaktadır.

## PROBLEMİN TANIMI VE FORMÜLASYONU (PROBLEM DESCRIPTION AND FORMULATION)

Bu çalışmada, esnek zaman pencere araç rotalama problemi (EZPARP) çalışılmıştır. EZPARP, zaman pencerelerinin ceza bedelleri ödenerek aşılabildiği zaman pencere araç rotalama probleminin bir çeşididir. Eğer araç belirlenen zaman pencerelerinden daha erken gelmişse erken gelme ceza maliyetine, daha geç gelmişse geç gelme ceza maliyetine katlanmak zorundadır. Fakat deponun zaman penceresi sağlanmak zorundadır (Badeau ve diğ., 1997).

EZPARP'nin matematiksel modeli şu şekildedir (Zare-Reisabadi ve Mirmohammadi, 2015):

### Dizin Kümeleri:

$N=\{0,1,\dots,n,n+1\}$  :Şubeler kümesi, {0} ana depo  
 $V=\{1,2,\dots,k\}$  :Araçlar kümesi

### Karar

#### Değişkenleri:

$x_{ijk}$  : $(i,j) \in A$  ayrıt turdaysa 1, değilse 0  
 $y_{ik}$  :Araçın i. müşteriye varış zamanı  
 $E_{ik}$  :Araçın i. müşteriye erken varış süresi  
 $L_{ik}$  :Araçın i. müşteriye geç varış süresi

### Parametreler:

$c_{ij}$  :i. müşteriden j. müşteriye seyahat maliyeti  
 $t_{ij}$  :i. müşteriden j. müşteriye seyahat süresi

|              |                                    |
|--------------|------------------------------------|
| $S_i$        | :Müşteriler için servis süresi     |
| $[e_i, l_i]$ | :Müşteriler için zaman pencereleri |
| $r_i$        | :Erken hizmet ceza maliyeti        |
| $h_i$        | :Geç hizmet ceza maliyeti          |
| $f_y$        | :Araçın ana depodan çıkma maliyeti |
| $Q_i$        | :i. müşterinin talep miktarı       |

**Kısıtlar:**

$$\min Z = \sum_{v=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n+1} c_{ij} X_{ij}^v + \sum_{v=1}^k \sum_{j=1}^n f_v X_{0j}^v + \sum_{i=1}^n r_i \sum_{v=1}^k E_i^v + \sum_{i=1}^n h_i \sum_{v=1}^k L_i^v$$

$$\sum_{v \in A_j} \sum_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^n X_{ij}^v = 1 \quad \forall j \in N/\{0, n+1\} \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{i0}^v = 1 \quad \forall j \in N/\{0, n+1\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{0j}^v = 1 \quad \forall j \in N/\{0, n+1\} \quad (3)$$

$$\sum_{v \in A_p} \sum_{i=0}^n X_{ip}^v - \sum_{v \in A_p} \sum_{j=1}^{n+1} X_{pj}^v = 0 \quad \forall p \in N/\{0, n+1\} \quad (4)$$

$$y_i^v + s_i + t_{ij}^v - y_j^v \leq (1 - X_{ij}^v)M \quad \forall v \in V, \forall i \in N/\{n+1\}, \forall j \in N/\{0\} \quad i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n d_j \sum_{i=0}^n X_{ij}^v \leq Ca_v \quad \forall v \in V \quad (6)$$

$$E_i^v \geq e_i \sum_{j=1}^{n+1} X_{ij}^v - y_i^v \quad \forall i \in N/\{0, n+1\}, \quad \forall v \in V \quad (7)$$

$$L_i^v \geq y_i^v - l_i \quad \forall i \in N/\{0, n+1\}, \quad \forall v = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

$$\sum_{v=1}^k y_0^v = 0 \quad (9)$$

$$X_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in N, \quad \forall v \in V \quad (10)$$

$$y_i^v, E_i^v, L_i^v \geq 0 \quad \forall i \in N, \quad \forall v \in V \quad (11)$$

Bu modelde, (1) ve (4) numaralı kısıtlar her müşterinin bir araç tarafından bir kez ziyaret edilmesini sağlamaktadır. (2) ve (3) numaralı kısıtlar her düğüme bir düğümden gelinip bu düğümden de tek bir düğüme geçilmesini sağlamaktadır. (5) numaralı kısıt aracın kalan zaman dilimine ve servis süresine bağlı olarak müşteriye varış zamanını hesaplayan kısıttır. (6) numaralı kısıt azami araç kapasitesini kontrol eder. (7) ve (8) numaralı kısıtlar müşteriye varış zamanına bağlı

olarak araçların erken ve geç varış sürelerini hesaplayan kısıtlardır. (9) numaralı kısıt her araç için tur saatini sıfırdan başlatır. (10) numaralı kısıt  $x_{ijk}$  karar değişkenini ikili olarak sınırlandırırken (11) numaralı kısıt zaman değişkenlerinin negatif olmamasını sağlamaktadır. Amaç fonksiyonu ise dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm; toplam seyahat maliyetini, ikinci bölüm; gerekli olan araçların sayısını azaltarak tüm araçların sabit maliyetlerinin toplamını, üçüncü ve dördüncü bölüm; tüm müşteriler için zaman penceresi ihlali cezasını en aza indirmeyi amaçlar.

### ÖNERİLEN ÇÖZÜM YÖNTEMİ(RECOMMENDED SOLUTION METHOD)

Bu çalışmada ele aldığımız EZARP kesin çözüm yöntemleri ile makul bir sürede çözülememiştir. Bu nedenle, önce müşterileri kümeleyerek problemi kesin çözüm yöntemi ile çözülebilir boyuta getirecek daha sonra ise kümelenmiş müşterileri rotalama işlemine tabi tutacak önce kümele-sonra rotala yöntemine dayalı iki aşamalı bir yaklaşım önerdik.

Yöntem Çizelge 1'de özetlenmiştir:

#### Çizelge 1. Önerilen çözüm yöntemi aşamaları

*Table1. Stages of recommended solution method*

|   |
|---|
| 1. Aşama: Kümeleme<br>Müşterilerin birbirlerine olan mesafeleri dikkate alınarak kümeleme analizi yöntemleri kullanılarak kümelenmesidir.                                   |
| 2. Aşama: Rotalama<br>1. Aşama sonucunda kümelenen müşteriler için en uygun dağıtım rotalarının karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli yardımıyla oluşturulmasıdır. |

### Kümeleme Analizi(Clustering Analysis)

Kümeleme analizi, veri kümesi içerisinde bulunan bilgilerin benzerliklerine bağlı olarak homojen gruplara bölmek amacıyla kullanılan çok değişkenli bir analiz yöntemidir (Johnson ve Wichern, 1992). Kümeleme analizinde asıl amaç; kümeler arasındaki benzerlikleri en aza indirmek ve kümelerin kendi içindeki benzerliklerini ise en yüksek seviyede tutmaktır (Tatlıdil, 2002).

Verilerin benzerliklerine göre kümelere bölünmesinde kullanılacak çeşitli yöntemler vardır. En çok kullanılan kümeleme yöntemleri hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan kümeleme olarak iki grupta toplanmaktadır (Blashfield ve Aldenferder, 1978). Bu çalışmada hiyerarşik olmayan kümeleme yöntemlerinden olan K-Means ve K-Medoids kümeleme algoritmaları kullanılmıştır.

K-Means algoritması en eski kümeleme yöntemlerinden biri olup J.B. MacQueen tarafından 1967 yılında geliştirilmiştir. Bu algoritmaya göre her veri sadece tek bir kümeye ait olabilmekte ve n adet veri nesnesi içeren veri kümesi, k adet kümeye bölünmektedir. K-Means algoritması dört temel adımdan oluşmaktadır (Sarıman, 2011). Bu adımlar:

Adım 1. Girilen k değeri kadar küme merkezi belirle

Adım 2. Küme merkezi dışında kalan verileri mesafelerine göre sınıflandır

Adım 3. Sınıflandırmaya göre yeni merkezler belirle

Adım 4. Merkezler kararlı hale gelene kadar 2. ve 3. adımları tekrar et.

K-Medoids algoritması ise Kaufman ve Rousseeuw tarafından 1987 yılında geliştirilmiştir. Bu algortmada veri kümesi, k adet kümeye bölünmektedir. Bu kümeleme yöntemindeki asıl amaç k adet küme içerisindeki verilerin benzerliklerinin yüksek, kümelerin ise benzersiz olmasıdır. Kümenin merkezine en yakın nokta temsilci nesnedir ve medoid olarak adlandırılır. Temsilci nesne,

kümenin diğer elemanlarına olan ortalama uzaklığı en küçük yapan kümenin en merkez noktasıdır (Işık, 2006).

K-Medoids algoritmasının işlem adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1. k adet kümenin başlangıç medoidlerini belirle

Adım 2. Her nesneyi kendisine en yakın medoide atayarak kümeleri oluştur

Adım 3. Temsilci nesne ile temsilci olmayan nesneyi değiştirerek kümelerin kararlılığını dene

Adım 4. Kümeler kararlı hale gelene kadar 2. ve 3. adımları tekrar et.

## UYGULAMA(APPLICATION)

### Problemin Tanımı(Definition of The Problem)

Bu çalışmada ana depodan çıkan araçların şube taleplerinin belirli zaman aralıklarında karşılanabilmesi için uygun araç rotalarının belirlenmesi problemi çözülmüştür. Şubelerin ürünleri kabul ettiği zaman aralıkları önceden bellidir. Eğer araç belirlenen zaman aralığından önce şubeye ulaşmış ise erken gelme ceza maliyetine, en geç hizmete başlama zamanından sonra ulaşmış ise geç gelme ceza maliyetine katlanmak zorundadır. Bu kısıtlar nedeniyle ele alınan problem esnek zaman pencereli araç rotalama problemidir (EZPARP).

Ele alınan problemde bir ana depo, dağıtım yapılacak olan 78 şube ve dağıtım yapacak olan araçlar bulunmaktadır. Şubelerin servis süreleri eşit ve 1 saattir. Şubelerin dağıtım yapılacak olan 21 haftalık talep verileri mevcuttur. Her şubenin ürün kabul edeceği farklı zaman pencereleri bulunmaktadır. Dağıtım gerçekleştirecek olan araçların kapasiteleri maksimum 40 palettir. Araç ana depodan çıkarak rotaya başlamalı, her şubeye tek bir araç uğramalı ve araç ana depoya döndüğünde rotayı sonlandırmalıdır.

### Problemin Çözümü(Solution of The Problem)

Ele alınan problemin 1. haftadaki talep miktarları dikkate alınarak detaylı çözümü aşağıda verilmiştir. Kalan 21 hafta sonuçları ve firmadan alınan gerçek maliyetler Çizelge6'da özetlenmiştir.

### Kümeleme(Clustering)

78 adet şube kümeleme analizi yöntemlerinden olan K-Means ve K-Medoids algoritmalarına göre ayrı ayrı kümelenebilirlerdir. Kümeleme işlemi sonucunda her bir kümenin sahip olduğu şubeler belirlenmiştir. Aşağıda kümeleme işlemi detaylı bir şekilde verilmiştir.

K-Means algoritmasına göre kümeleme yapılırken farklı k (küme sayısı) değerleri, küme merkezleri kararlı hale gelene kadar denenmiş ve elde edilen kümeleme sonuçlarından en uygun k değeri 11 olarak seçilmiştir. 78 şube belirlenen 11 adet kümeye sınıflandırılmıştır.

K-Means algoritması sonucunda oluşan kümeler ve uğranacak şubeler Çizelge2'de verilmiştir.

### Çizelge 2. K-Means algoritması sonucunda oluşan kümeler ve uğranacak şubeler

Table 2. Clusters and related stores as a result of the K-Means algorithm

| Kümeleler | Şubeler  |
|-----------|--|
| 1         | 79-49-50-51  |
| 2         | 79-17-18-20-21-22-23-25-28-31-33-36-38-39-41-42-44-45-46 |
| 3         | 79-32-34-35-37-40-43-47-48                               |
| 4         | 79-72-74-75-76-77-78                                     |
| 5         | 79-1-2-4-5-6   |
| 6         | 79-66-67-68-69-70-71-73                                  |
| 7         | 79-30-52-53-54-55-56-57                                  |
| 8         | 79-7-8-9-10-11-12  |
| 9         | 79-60-63-64-65   |
| 10        | 79-58-59-61-62   |
| 11        | 79-3-13-14-15-16-19-24-26-27-29                          |

K-medoids algoritmasına göre kümeleme yapılırken farklı k (küme sayısı) değerleri, kümeler kararlı hale gelene kadar denenmiş ve elde edilen kümeleme sonuçlarından en uygun k değeri 11 olarak seçilmiştir. 78 şube belirlenen 11 adet kümeye sınıflandırılmıştır.

K-Means algoritması sonucunda oluşan kümeler ve uğranacak şubeler Çizelge 3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.** K-Medoids algoritması sonucunda oluşan kümeler ve uğranacak şubeler

*Table 3. Clusters and related stores as a result of the K-Medoids algorithm*

| KÜMELELER | ŞUBELER                                      |
|-----------|--|
| 1         | 79-30-50-51-52-53-54-56-57                   |
| 2         | 79-17-18-20-22-23-25-36-38-41-42-44-45-46-55 |
| 3         | 79-16-19-21-26-27-28-31-33-39-40-43-47-48    |
| 4         | 79-72-75-77-78                               |
| 5         | 79-1-2-3-4-5-6                               |
| 6         | 79-66-67-68-69-70-71-73                      |
| 7         | 79-74-76                                     |
| 8         | 79-7-8-9-10-11-12                            |
| 9         | 79-60-63-64-65                               |
| 10        | 79-49-58-59-61-62                            |
| 11        | 79-13-14-15-24-29-32-34-35-37                |

### **Rotalama(Routing)**

Bu aşamada, K-Means ve K-Medoids algoritmalarına göre kümelenen müşterilerin 1. haftadaki talep verileri dikkate alınarak kurulan karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli yardımıyla çözümlenerek araçların rotaları bulunmuştur. Çizelge 4'te K-Means algoritmasına göre, Çizelge 5'te K-Medoids algoritmasına sınıflanan müşterilere ait rota ve maliyet bilgileri yer almaktadır. 21 haftanın tümüne ait maliyetler özet şekilde Çizelge 6'da verilmiştir. Bu oluşturulan rotalardaki 79 numaralı şube ana depoyu temsil etmektedir.

**Çizelge 4.** K-Means algoritması sonucunda araçların izleyeceği rotalar ve maliyetler*Table 4. The routes and the total cost for each vehicle as a result of the K-Means algorithm*

| KÜMELER | ARAÇLAR | ROTALAR           | MALİYET<br>(TL) |
|---------|---------|-------------------|-----------------|
| 1       | 1       | 79-49-51-50-79    | 2442            |
| 2       | 1       | 79-39-79          | 23358           |
|         | 2       | 79-44-25-17-79    |                 |
|         | 3       | 79-33-22-79       |                 |
|         | 4       | 79-18-42-46-21-79 |                 |
|         | 5       | 79-20-31-79       |                 |
|         | 6       | 79-36-38-23-79    |                 |
|         | 7       | 79-28-79          |                 |
|         | 8       | 79-41-45-79       |                 |
| 3       | 1       | 79-34-40-32-43-79 | 13594           |
|         | 2       | 79-37-47-35-48-79 |                 |
| 4       | 1       | 79-77-75-78-72-   | 10752           |
|         | 2       | 74-79<br>79-76-79 |                 |
| 5       | 1       | 79-5-6-4-1-79     | 5098            |
|         | 2       | 79-2-79           |                 |
| 6       | 1       | 79-70-73-68-79    | 9536            |
|         | 2       | 79-67-79          |                 |
|         | 3       | 79-71-69-66-79    |                 |
| 7       | 1       | 79-54-57-30-79    | 9308            |
|         | 2       | 79-55-52-53-56-79 |                 |
| 8       | 1       | 79-8-9-79         | 13836           |
|         | 2       | 79-7-12-10-11-79  |                 |
| 9       | 1       | 79-60-63-79       | 1724            |
|         | 2       | 79-64-65-79       |                 |
| 10      | 1       | 79-58-62-61-59-79 | 3248            |
| 11      | 1       | 79-13-19-79       | 17204           |
|         | 2       | 79-3-15-16-27-79  |                 |
|         | 3       | 79-26-24-14-79    |                 |
|         | 4       | 79-29-79          |                 |



**Çizelge 5.** K-Medoids algoritması sonucunda araçların izleyeceği rotalar ve maliyetler

*Table 5. The routes and the total cost for each vehicle as a result of the K-Medoids algorithm*

| KÜMELER | ARAÇLAR | ROTALAR                    | MALİYET (TL) |
|---------|---------|----------------------------|--------------|
| 1       | 1       | 79-52-79                   | 10878        |
|         | 2       | 79-56-51-54-79             |              |
|         | 3       | 79-57-53-50-79             |              |
|         | 4       | 79-30-79                   |              |
| 2       | 1       | 79-44-18-79                | 17776        |
|         | 2       | 79-17-45-46-79             |              |
|         | 3       | 79-55-22-25-               |              |
|         | 4       | 23-79                      |              |
|         | 5       | 79-42-79                   |              |
|         | 6       | 79-20-38-36-79<br>79-41-79 |              |
| 3       | 1       | 79-27-33-79                | 19322        |
|         | 2       | 79-39-79                   |              |
|         | 3       | 79-16-79                   |              |
|         | 4       | 79-26-31-79                |              |
|         | 5       | 79-28-79                   |              |
|         | 6       | 79-48-19-21-79             |              |
|         | 7       | 79-43-40-47-79             |              |
| 4       | 1       | 79-78-72-79                | 6050         |
|         | 2       | 79-77-75-79                |              |
| 5       | 1       | 79-4-6-3-79                | 6006         |
|         | 2       | 79-5-1-2-79                |              |
| 6       | 1       | 79-70-73-68-79             | 9356         |
|         | 2       | 79-67-79                   |              |
|         | 3       | 79-71-69-66-79             |              |
| 7       | 1       | 79-74-76-79                | 3340         |
| 8       | 1       | 79-8-9-79                  | 12490        |
|         | 2       | 79-7-12-10-11-<br>79       |              |
| 9       | 1       | 79-60-63-79                | 3180         |
|         | 2       | 79-64-65-79                |              |
| 10      | 1       | 79-58-79                   | 3634         |
|         | 2       | 79-61-49-59-<br>62-79      |              |
| 11      | 1       | 79-34-29-14-79             | 14442        |
|         | 2       | 79-32-37-35-               |              |
|         | 3       | 13-79<br>79-15-24-79       |              |

**Çizelge 6.** Kmeans, K-Medoids algoritmalarının ve gerçek maliyetlerinin karşılaştırılması*Table 6. Comparison of Kmeans, K-Medoids algorithms and their actual costs*

| Hafta | K-Means<br>Toplam Maliyet<br>(TL) | K-Medoids<br>Toplam Maliyet<br>(TL) | Gerçek<br>Maliyetler (TL) |
|-------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1     | 110100                            | 106474                              | 110400                    |
| 2     | 107848                            | 104591                              | 108148                    |
| 3     | 112652                            | 102218                              | 112952                    |
| 4     | 105424                            | 98833                               | 105724                    |
| 5     | 104680                            | 101952                              | 104980                    |
| 6     | 107510                            | 101800                              | 107810                    |
| 7     | 106822                            | 103612                              | 107122                    |
| 8     | 108924                            | 95236                               | 109224                    |
| 9     | 114560                            | 98204                               | 114860                    |
| 10    | 105564                            | 101664                              | 105864                    |
| 11    | 108184                            | 101328                              | 108484                    |
| 12    | 105402                            | 102304                              | 105702                    |
| 13    | 105078                            | 98728                               | 105378                    |
| 14    | 110598                            | 101074                              | 110898                    |
| 15    | 112752                            | 105366                              | 113052                    |
| 16    | 109068                            | 105804                              | 109368                    |
| 17    | 114216                            | 103540                              | 114516                    |
| 18    | 108636                            | 105810                              | 108936                    |
| 19    | 103800                            | 95426                               | 104100                    |
| 20    | 123330                            | 97092                               | 123630                    |
| 21    | 113370                            | 105576                              | 113670                    |

**ANOVA Testi(ANOVA Test)**

Çizelge 6'daki sonuçlara SPSS programında ANOVA testi uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

$H_0: \mu_1=\mu_2=\mu_3$  (K-Means, K-Medoids algoritmaları ile bulunan toplam maliyetlerin ve firmadan alınan gerçek maliyetlerin ortalamaları arasında fark yoktur.)

$H_1: \mu_1\neq\mu_2\neq\mu_3$ (K-Means, K-Medoids algoritmaları ile bulunan toplam maliyetlerin ve firmadan alınan gerçek maliyetlerin ortalamaları farklıdır.)

Olacak şekilde hipotezler tanımlanmıştır.

Anova testi uygulandığında ilk olarak varyansların homojen olup olmadığı incelenmektedir. Varyansların homojenliği tablosu incelendiğinde (Çizelge 7) p (sig.) değeri  $0,579>0,05$  olduğundan dolayı grup varyanslarının eşit olduğu sonucuna varılmaktadır.

**Çizelge 7.** Varyansların homojenliği testi*Table 7. Test of homogeneity of variances*

| LeveneStatistic | df1 | df2 | Sig. |
|-----------------|-----|-----|------|
| ,551            | 2   | 60  | ,579 |

Grup varyansları eşit olduğu için Çizelge8'deki ANOVA testinin sonuçları anlamlı olacaktır. ANOVA testi tablosundaki p (sig.) değeri  $0<0,05$  olduğundan dolayı yukarıda tanımlanan hipotezlerden  $H_1$  hipotezi kabul edilir.  $H_1$  hipotezi kabul edildiği için K-Means, K-Medoids algoritmaları ile bulunan toplam maliyetlerin ve firmadan alınan gerçek maliyetlerin ortalamaları farklıdır diyebiliriz.

**Çizelge 8.** ANOVA testi sonuçları

*Table 8. ANOVA test results*

|                       | Sum of Squares | df | MeanSquare    | F      | Sig. |
|-----------------------|----------------|----|---------------|--------|------|
| <b>Between Groups</b> | 865607898,285  | 2  | 432803949,142 | 24,325 | ,000 |
| <b>Within Groups</b>  | 1067547406,571 | 60 | 17792456,776  |        |      |
| <b>Total</b>          | 1933155304,857 | 62 |               |        |      |

Çizelge 9’da ele alınan problemin K-Means, K-Medoids algoritmaları ile çözümü sonucunda ve firmadan alınan gerçek maliyetlerin ortalamaları verilmiştir. Toplam maliyetlerin ortalaması K-Means algoritması ile 109453,24 TL, K-Medoids algoritması ile 101744,38 TL ve firmanın gerçek maliyetlerinin ortalaması ise 109753,24 TL olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar bize k-medoids algoritmasının daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

**Çizelge 9.** Tanımlayıcı istatistikler

*Table 9. Descriptive statistics*

|                              | N  | Mean      | Std. Deviation | Std. Error |
|------------------------------|----|-----------|----------------|------------|
| <b>K-Means Algoritması</b>   | 21 | 109453,24 | 4567,023       | 996,606    |
| <b>K-Medoids Algoritması</b> | 21 | 101744,38 | 3414,963       | 745,206    |
| <b>Firma Maliyetleri</b>     | 21 | 109753,24 | 4567,023       | 996,606    |
| <b>Total</b>                 | 63 | 106983,62 | 5575,144       | 703,505    |

## SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada zaman pencereli araç rotalama probleminin bir çeşidi olan EZPARP ele alınmış ve çözümü için ise önce kümele sonra rotala temelli bir yöntem önerilmektedir. Bu yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. Önerilen yöntemin birinci aşamasında şubeler birbirlerine ve ana depoya olan uzaklıkları göz önüne alınarak kümelenebilir. Dolayısıyla bu süreç EZPARP’nin boyutunu küçültmekte ve kesin çözüm yöntemlerinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. İkinci aşamada ise, kümelenen müşteriler için en uygun dağıtım rotaları karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli ile oluşturulmaktadır. Önerilen yöntemin etkinliği perakende sektöründeki bir örnek olay üzerinde denenmiştir.

Perakende sektöründeki firma; bir ana depo, dağıtım yapılacak olan 78 şubeye sahiptir. Şubelerin servis süreleri eşit ve 1 saattir. Şubelerin dağıtım yapılacak olan 21 haftalık talep verileri mevcuttur. Her şubenin ürün kabul edeceği farklı zaman pencereleri bulunmaktadır. Dağıtım gerçekleştirilecek olan araçların kapasiteleri maksimum 40 palettir. Bu teslimat probleminde ilk olarak şubeler, birbirlerine ve ana depoya olan uzaklıkları göz önüne alınarak K-Means ve K-Medoids algoritmaları yardımıyla kümelenebilir. Daha sonra ise kümelenen müşteriler için en uygun dağıtım rotalarının karışık tam sayılı doğrusal programlama modeli ile oluşturulmasıdır. Firmadan alınan gerçek maliyetler ile bu iki algoritmayla elde edilen sonuçlar ANOVA testi ile karşılaştırılmıştır. Toplam maliyetlerin ortalaması K-Means algoritması ile 109453,24 TL, K-Medoids algoritması ile 101744,38 TL ve firmanın gerçek maliyetlerinin ortalaması ise 109753,24 TL olarak bulunmuştur. Bu

sonuçlar bize K-Medoids algoritmasının daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir. Bu olumlu sonuçlar nedeniyle, önerilen yaklaşımın uygulanması firmanın maliyetlerini %7 oranında azaltacaktır.

#### KAYNAKLAR(REFERENCES)

Aydemir, E., 2006, *Esnek Zaman Pencereci Araç Rotalama Problemi ve Bir Uygulama*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Badeau, P., Guertin, F., Gendreau, M., Potvin, J., Taillard, E., 1997, "A Parallel Tabu Search Heuristic for The Vehicle Routing Problem with Time Windows", *Transportation Research Part-C*, Vol. 5, No. 2, pp. 109-122.

Blashfield, R. K., Aldenderfer, M. S., 1978, "The Literature on Cluster Analysis", *Multivariate Behavioral Research*, Vol. 13, pp. 271-295.

Bozyer, Z., Alkan, A., Fıçlalı, A., 2014, "Cluster-First, Then-Route Based Heuristic Algorithm for The Solution of Capacitated Vehicle Routing Problem", *International Journal of Informatics Technologies*, Vol. 7, pp. 29-37.

Chiang, W. C., Cheng, C. Y., 2017, "Considering the Performance Bonus Balance in the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows", *Procedia Manufacturing*, Vol. 11, pp. 2156 – 2163.

Calvete, H. I., Galé, C., Oliveros, M. J., Sánchez-Valverde, B., 2007, "A Goal Programming Approach to Vehicle Routing Problems with Soft Time Windows", *European Journal of Operational Research*, Vol. 177, pp. 1720–1733.

Cömert, S.E., Yazgan, H.R., Sertvuran, İ., Şengül, H., 2018, "Sıkı Zaman Pencereci Araç Rotalama Probleminin Çözümü için Yeni Bir Yöntem Önerisi ve Bir Süpermarket Zincirinde Uygulanması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 22, No. 2, pp. 1-6.

Crainic, T. G., Mancini, S., Perboli, G., Tadei, R., 2008, *Clustering-Based Heuristics for The Two-Echelon Vehicle Routing Problem*, Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.

Çalışkan, K., 2011, *Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Araç Rotalama Probleminin Maliyetlerinin Kümeleme Tekniği ile İyileştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Fagerholt, K., 2001, "Ship Scheduling with Soft Time Windows: An Optimisation Based Approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 131, pp. 559- 571.

Hair, J. F. Jr., Anderson, R. E., Tatham, R. L., Black, W. C., 1995, *Multivariate Data Analysis*, 3rd ed, Macmillan Publishing Company, New York.

Işık, M., 2006, *Bölünmeli Kümeleme Yöntemleri ile Veri Madenciliği Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Johnson, A. R., Wichern, D. W., 1992, *Applied multivariate statistical analysis*, International Editions, New Jersey: PrenticeHall.

Kaufman, L., Rousseeuw, P. J., 1990, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, New York: John Wiley & Sons Inc.

Min, H., 1991, "A Multiobjective Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows: The Case of a Public Library Distribution System", *Socio-Economic Planning Science*, Vol. 25, No. 3, pp. 179-188.

Nallusamy, R., Duraiswamy, K., Dhanalaksmi, R., Parthiban, P., 2010, "Optimization of Non-Linear Multiple Traveling Salesman Problem Using K-Means Clustering, Shrink Wrap Algorithm and Meta-Heuristics", *International Journal of Nonlinear Science*, Vol. 9, No. 2, pp. 171-177.

Qureshi, A. G., Taniguchi, E., Yamada, T., 2009, "An Exact Solution Approach for Vehicle Routing and Scheduling Problems with Soft Time Windows", *Transportation Research Part E*, Vol. 45, pp. 960–977.

Qureshi, A. G., Taniguchi, E., Yamada, T., 2010, "Exact Solution for the Vehicle Routing Problem with Semi Soft Time Windows and Its Application", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 2, 5931–5943.

Sarıman, G., 2011, "Veri Madenciliğinde Kümeleme Teknikleri Üzerine Bir Çalışma K-Means ve K-Medoids Kümeleme Algoritmalarının Karşılaştırılması", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Vol. 15, No. 3, pp. 192-202.

Sexton, T. R., Choi, Y. M., 1986, "Pickup and Delivery of Partial Loads with Soft Time Windows", *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, Vol. 6, No. 3, pp. 369-398.

Şen, T., 2014, *Kümeleme ve Genetik Algoritma Destekli Yaklaşımlarla Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Probleminin Çözümü: Perakende Zincirinde Uygulanması*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

Taş, D., Jabali, O., Woensel, T. V., 2014, "A Vehicle Routing Problem with Flexible Time Windows", *Computers & Operations Research*, Vol.52, pp. 39-54.

Tatlıdil, H., 2002, *Uygulamalı çok değişkenli istatistiksel analiz*, Ziraat Matbaacılık A.Ş., Ankara, 329-332.

Thangiah, S. R., Salhi, S., 2001, "Genetic Clustering: An Adaptive Heuristic for the Multidepot Vehicle Routing Problem", *Applied Artificial Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 361-383.

Toth, P., Vigo, D., 2002a, "An overview of vehicle routing problems-chapter 1", *The vehicle routing problem*, SIAM, Philadelphia, 1-26.

Toth, P., Vigo, D., 2002b, *The vehicle routing problem*, Philadelphia: SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications.

Ünsal, Ö., Yiğit, T., 2018, "Yapay Zeka ve Kümeleme Teknikleri Kullanılarak Geliştirilen Yöntem ile Okul Servisi Rotalama Probleminin Optimizasyonu", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Vol. 6, No. 1, pp. 7-20.

Yücenur, G. N., Demirel, N. G., 2011, "A Hybrid Algorithm with Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization for Solving Multi-Depot Vehicle Routing Problems", *Journal of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 29, pp. 340-350.

Zare-Reisabadi E., Miirmohammadi, S. H., 2015, "Site Dependent Vehicle Routing Problem With Soft Time Window: Modeling and solution Approach", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 90, pp. 177-185.



## SOLVING THE CLASSIFICATION PROBLEM OF CIRCULAR METAL OBJECTS WITH ENGRAVED CHARACTERS BY IMAGE PROCESSING METHODS

<sup>1</sup>Mahmut Sami YASAK , <sup>2</sup>Hasan Erdiñç KOÇER 

<sup>1</sup>Selcuk University, The Graduate School of Natural and Applied Science, The Degree of Master of Science in Mechatronics Engineering, Konya, TURKEY

<sup>2</sup>Selcuk University, Faculty of Technology, Electrical and Electronics Engineering Department, Konya, TURKEY

<sup>1</sup>[mahmut@rotecvision.com](mailto:mahmut@rotecvision.com), <sup>2</sup>[ekocer@selcuk.edu.tr](mailto:ekocer@selcuk.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.08.2019)

**ABSTRACT:** In this study, two different solution ways have been developed for the problem of classification of industrial small circular metal objects on the surfaces of engraved metal. It is the first proposed solution to perform the pattern matching with XOR operator by extract the character region of the circular metal objects as a pre-process, making the model of the Daugman's Rubber Sheet Model (DRSM) and performing feature extraction. As a result, obtained that average processing time is 69,72 milliseconds and 0,9398 accuracy rate in the first proposed solution. The second solution is the optical character recognition (OCR) on the circular metal objects that to be realized character region detection and character segmentation as a result of the Maximal Stabil Extremal Region (MSER) and Stroke Width Transform (SWT) algorithms. Character recognition realized by using the model of Convolutional Neural Network (CNN) class which is a deep machine learning approach of artificial intelligence. The character recognition problem of the circular metal objects provided at the same time solved the problem of object classification. As a result, obtained that average processing time is 1,596 second and 0,9719 accuracy rate in the second proposed solution.

**Key Words:** Object Character Recognition Problem, Object Classification Problem, Convolutional Neural Network, Machine Learning, XOR Pattern Matching, Daugman's Rubber Sheet Model, Circular Hough Transform, Maximal Stabil Extremal Region, Stroke Width Transform, Image Processing

### Oyma Karakterlere Sahip Dairesel Metal Cisimlerin Sınıflandırma Probleminin Görüntü İşleme Yöntemleri İle Çözümü

**ÖZ:** Bu çalışmada, endüstriyel üretim olan dairesel küçük çaplı metal cisimlerin yüzeyleri üzerine oyma işlemi gerçekleştirilmiş karakterlere göre sınıflandırılması problemi için 2 farklı çözüm yolu geliştirilmiştir. Dairesel metal cisimlerin görsellerinin ön aşama olarak karakter bölgesinin çıkartılıp, Daugman's Rubber Sheet (DRSM) modeli haline getirilmesi ve özellik çıkarımı gerçekleştirilerek, XOR operatörü ile şablon eşleştirme gerçekleştirilmesi önerilen ilk çözüm yoludur. İlk önerilen yöntemin sonucunda, ortalama işlem süresi 69,72 milisaniye ve 0,9398 doğruluk oranı başarımlar parametreleri olarak elde edilmiştir. İkinci çözüm yolu, dairesel metal cisimler üzerindeki karakterlerin Maximally Stabil Extremal Region (MSER) ve Stroke Width Transform (SWT) algoritmaları sonucu karakter bölgesi tespiti ve karakter segmentasyonu gerçekleştirilerek yapay zekanın derin öğrenme yaklaşımlarından Convolution Neural Network (CNN) sınıfı tasarlanan model ile karakter tanınması gerçekleştirilmiştir. Karakter tanınması sağlanan dairesel metal cisimlerin aynı zamanda nesne sınıflandırma problemi çözülmüştür. İkinci olarak önerilen yöntemde ise, ortalama işlem süresi 1,596 saniye ve 0,919 doğruluk oranı başarımlar parametreleri olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nesne Karakter Tanıma Problemi, Nesne Sınıflandırma Problemi, Evrimsel Sinir Ağları, Makine Öğrenmesi, XOR Şablon Eşleştirme, Daugman's Rubber Sheet Modeli, Dairesel Hough Dönüşümü, Maksimum Kararlı Ekstrimal Bölgeler, Kontür Genişliği Dönüşümü, Görüntü İşleme

## INTRODUCTION

Image processing algorithms for object detection, object identification, object classification, and object tracking problems and artificial intelligence algorithms in computer vision are frequently used to solve these problems. The problem of recognizing objects, solving speed and success precision factors, in other words, more successful methods are continuously developed. The object classification algorithms used for general purpose are fast and accurate and can recognize a wide variety of objects.

Convolutional Neural Networks (CNN), which is developed as one of the Neocognitron is defined by Fukushima that classes of hierarchical multilayered deep neural networks (Fukushima, 1980). YOLOv2 (YOLO-You Only Look Once), which is frequently used for the object classification problem, or YOLO9000 algorithm with another name, can classify 9000 class objects, it can estimate the real-time changing frames of objects in the VOC metric classification by 73.4% mAP (mean Average Precision - mean Average Sensitivity) (Redmon and Farhadi, 2017). The more advanced YOLOv3 algorithm uses COCO datasets, It has solved the problem of object classification on images having of 51.5% mAP in the COCO mAP metric classification with a resolution of 320x320 in 22 ms (Redmon and Farhadi, 2019). YOLO algorithms with high speed and accuracy rates for classification are trained with images with different data sets to solve problems in different areas. For example; By adding Dense layers to the YOLOv3 algorithm used to classify the real-time maturity of apples in the orchards, apple maturity in the 3000x3000 resolution images with an accuracy of 81.7% was estimated (Tian *et al.*, 2019).

In this study, the classification problem according to the characters on the circular metal objects produced in the industrial environment is presented with two solutions. Circular metal objects have different diameters with respect to shape and are approximately 27.85 mm to 38 mm in diameter. The height varies between 6.07 mm and 6.90 mm, also height values for the flash section located around the body is ranges from approximately 1.90 mm to 3 mm. These measurements have been made by Euroricambi electronic digital caliper measuring device. On the surface of circular metal objects include expressions or characters (letter, number, symbol, punctuation, etc.) that have many purposes, such as brand, model and serial number, to be classified as shown in Figure 1.



**Figure 1.** Sample products: some of the circular metal objects with engraved characters

These characters are engraved on their surface. The engraving process was carried out by pressing the press machine with certain molds/seals on circular metal objects. As a result of this non-sensitive pressing, the characters are not markedly engraved on the metal surface.

The industrial camera device is used for sampling images of circular metal objects. The visuals obtained with the industrial camera device are expressed as visual results of the camera. Obtained images, image processing algorithms and artificial intelligence fields of CNN with deep learning classes, specified the classification index according to the engraved characters on the metal surfaces, solved by the following methods.

XOR Pattern Matching method is the first method applied to object classification problem in the image processing process. As a priority for this method, respectively, to be applied of Laplace of Gaussian (LoG) filter (Marr and Hildreth, 1980) to the visual results of the camera, Canny (Canny, 1986) edge detection algorithm, Circular Hough Transform (CHT) (Lam and Yuen, 1996) algorithm, extraction of Daugman's Rubber Sheet Model (DRSM) (Daugman, 1997) of obtained image, to be applied of Gabor Filter (GF) (Gabor, 1946) and using the phase image as a result, extraction of Average Absolute Deviation (AAD) of obtained image that showing normalized the image and realized feature extraction. These matrix operations, respectively, Thresholding transform, matrix transposition, an image in order to extend the horizontal alignment from the size 99x750 to 1x74250. This obtained matrix space has uploaded to the database to be paired later for each image to be sampled, thus, the priority processes are completed. For each new raw image taken into the object classification problem, the primary operations are repeated and the XOR operator is processed with each matrix space in the database. Accessible the ratio of logical "1" and "0" values obtained after the XOR operation process located. The ratio of the binary value "0" in the image determines the ratio of the pattern matching. The object classification problem has been solved by matching the pattern name in the database with the highest pattern matching rate. You can see the results in Table 2.

Pretreatment methods for the Optical Character Recognition (OCR) method, which is the second method used in image processing are, respectively, to be applied of LoG Filter, Canny edge detection algorithm and finally CHT algorithm. The characters on the circular metal surfaces are located in the center of the objects and are at a certain height of the objects. The character region expression for the characters in this section will be used. In addition, the visual results of the camera were taken according to these criteria in order to find the character region. According to the results obtained from the applied of CHT algorithm for finding the character area of the identified objects, 3 different circle diameters were obtained. The region within the smallest or innermost circle was found to be the front character region of the circular metal surfaces. To find clearly the characters region and characters segmentation of the extracted pre-character region images, respectively, to be applied of Sharpen Filter (SF), Maximally Stable Extremal Regions (MSER) (Mikolajczyk *et al.*, 2005) algorithm and Stroke Width Transform (SWT) (Epshtein *et al.*, 2010) algorithm. The MSER and SWT algorithms applied for the situations where the characters are in the circular, inverse, or polar plane alignment yielded successful results. Character images obtained as a result of character segmentation are made ready for OCR processing. Designed a CNN model from deep learning classes for OCR processing and the model trained with reproducing obtained character images and using EMNIST (Cohen *et al.*, 2017) dataset. The trained model applied to character images and it predicted the characters. For obtained results of output layer (softmax-dense layer-classification layer) of this model. Thus, the solution of optical character recognition for the classification problem of circular metal objects constitutes the second method of this study.

## RELATED WORKS AND LITERATURE RESEARCH

### XOR pattern matching approach

The template matching method, which is another approach performed by image processing methods for object classification problem, consists of the basis of decision-making based on the matching



percentages by recording the main images as the template as a template and processing them with the images for matching.

In Bala and Tajinder work, solved the problem of object classification or the problem of Content-Based Image Retrieval (CBIR) (Subrahmanyam *et al.*, 2013) with a proposition called HSV (Hue Saturation Value) histogram and a local text on XOR pattern (LTxXORP) (Bala and Tajinder, 2016). The images obtained from the HSV information were navigated with the matrix with the determined structural component using the scale invariant feature transform (SIFT) (Heikkila *et al.*, 2009) method to develop the method of the Local Binary Pattern (LBP) (Ojala *et al.*, 1996) and to obtain the LTxXORP value.

In another study developed by Chawla and Oberoi, that provides solutions to problems such as human discrimination or human identity within the object classification problem, the human eye iris layer was visualized by using the images, respectively, by the image of DRSM (Daugman, 2003), to be applied GF. The resulting image is converted to a binary image and the images in the database are processed by the XOR operator. A mating relationship is established with Hamming distance data. In this study using CASIA data, the average matching time was solved in 133.7 seconds and the human identification problem was determined by the ratio of hamming distance to 0.3486 (Chawla and Oberoi, 2011).

### Optical character recognition approach

In order to solve the object classification problem, OCR approach consists of image processing methods, character area detection and character segmentation preprocesses.

A sample study has carried out the regional determination of characters on natural images using the geometry and contour information of the edges-enhanced MSER algorithm for the problem of detection of the character region (Huizhong *et al.*, 2011). In that study, using the combination of Canny edge finding operator and MSER algorithm, it has solved the character zone and segmentation problem of relatively small character and fuzzy images on the ICDAR 2003 and 2005 datasets with a 60% accuracy, metric of  $f$  is 66% which is a combination of precision and best match rate of and 60% best match ratio.

In another study, that have brought solutions for the character recognition problem, different fonts, font thickness, font geometry, font colors, text, font size, text blurring, such as challenging images. By combining MSER and adaptive thresholding methods, a solution was developed for character segmentation, and non-textual shapes or objects were identified and taken out of the visual (Gonzalez *et al.*, 2012). To distinguish between non-text objects and text characters, from the classifiers based on the Support Vector Machine (SVM) (Chapelle *et al.*, 1999), Mean Difference Feature (MDF) (Hanif and Prevost, 2009), Standart Deviation (SD) and Histograms of Oriented Gradient (HOG) (Dalal and Triggs, 2005) methods were used. By applying work on ICDAR 2003 data sets, it solved the problem of character area detection and character segmentation with an 81% accuracy, metric of  $f$  is 67% which is a combination of precision and best match rate of and 57% best match ratio.

A contrast-enhanced MSER algorithm is applied for character segmentation, and in another study, the problem of character-zone detection with the application of the Stroke Width Transform (SWT) algorithm, methods for the detection and elimination of non-text objects in geometric constraints are presented (Li and Lu, 2012). Firstly, the character region of the images with fuzzy characters was performed with the contrast-enhanced MSER algorithm developed for the blurred state of the character region obtained by the basic MSER algorithm (Matas *et al.*, 2004). Secondly, the non-text objects were visualized after the geometric restriction operation using the parameters determined according to the character dimensions and saturation values between 0.3mm-3mm (3-30 pixel) and the aspect ratio used in Zhao study (Zhao *et al.*, 2011). Finally, in order to analyze the alignment of the texts, the problem of character area detection was solved by using to applied of the skeleton filter of the characters by using the algorithm (Shivakumara *et al.*, 2011) study using the contour width of the texts. By applying work on ICDAR 2003 data sets, it solved the problem of character area detection and character segmentation with

a 59% accuracy, metric of  $f$  is 59% which is a combination of precision and best match rate of and 59% best match ratio, and solved the character segmentation problem.

In another study for character zone detection and character recognition problems for real-time and low-contrast images, low-contrast areas are scanned for detection of the character region. This method is called difficult regions (Extremal Region), the characters in the region of the outside pixels RGB and HSI values, the region itself is higher than the RGB and HSI values have been introduced (Neumann and Matas, 2012). At this stage, two types of classification criteria are indicated. Firstly, the binary image obtained by the efficient threshold value is counted with 2x2 pixel patterned Euler Counter (Pratt, 2001), and it is determined that the topological properties of image are obtained using Real AdaBoost (Schapire and Singer, 1999) classifier is one of the decision tree/classifier that uses parameters such as aspect ratio and compactness. Secondly, the topological feature visualization was obtained by using the Radial Basis Function (RBF) (Müller *et al.*, 2001) method from the classifiers based on SVM. The comparison of the detected secondary visual properties with the RGB and HSI results resulted in the problem of character region extraction in low contrast regions. By applying work on ICDAR 2003 data sets, it solved the problem of character area detection and character segmentation with a 73.1% accuracy, metric of  $f$  is 68.7% which is a combination of precision and best match rate of and 64.7% best match ratio, and solved the character segmentation problem.

### Convolutional neural network approach

The CNN deep learning algorithm, which is extremely useful for object classification problem, is successfully used in the problem of defining characters such as optical characters and handwriting.

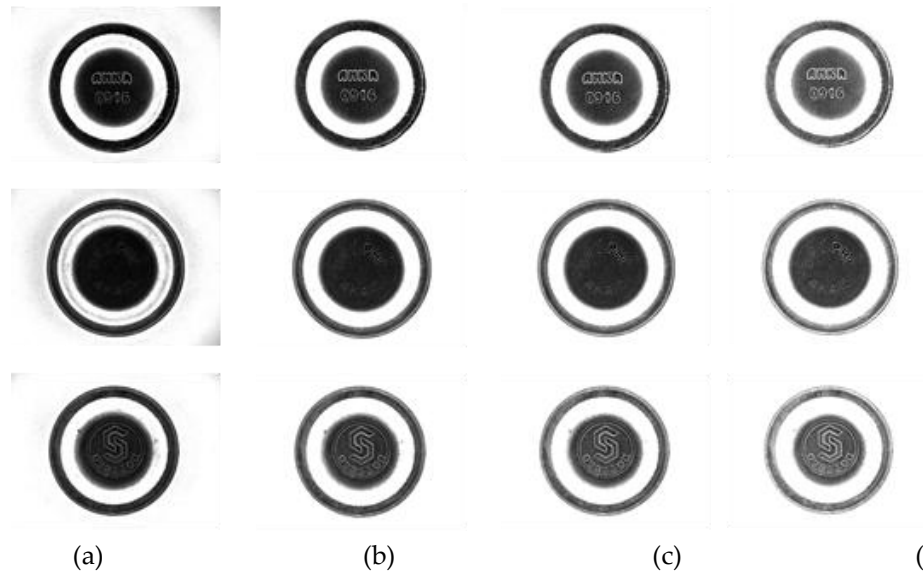
In a sample study developed by Zhou and *et al.*, one of the CNN classes developed to find the visual region of the characters is introduced to the model called PVANet2x, the Fully Convolution Network (FCN) (Long *et al.*, 2015) model. For the design of the model, the dimensions of the character regions in the image and the geometry parameters of the character regions are evaluated, 4 Conv layer + 3 Unpooling layer + FC layer + 4 classification value model is created. Using the ICDAR 2015 data set for the training of the model, it has also solved the problem of character zone detection with the accuracy of 83.27% in the ICDAR metric classification, the metrics ratio is 80.72%, the combination of precision and best match rate is 78.33% (Zhou *et al.*, 2017).

In Xie and *et al.* study, for the problem of character-zone detection, we developed the algorithm of the Feature Pyramid Network (FPN) (Ma *et al.*, 2018) from the CNN class, which was inspired by the reinforcement algorithm (He *et al.*, 2017) to introduce the Supervised Pyramid Context Network (SPCNET) algorithm (Xie. *et al.*, 2018). The structure of the model is multilayered and consists of respectively, FPN structure layer + the text context classifier module which they develop in their work for pre-classification + mask RCNN model. The ResNet50 model is used for the Mask RCNN model, using the ICDAR 2015 data set to determine the character region solved with the accuracy of 88.7% in the ICDAR metric classification, the metrics ratio of 87.2%, the combination of precision and best match rate is 85.8%.

## MATERIAL AND METHODS

### Classification with XOR pattern matching

The results of the Dark-Field Ring IR light source selected for visualization of the circular metal surfaces according to the parameters generated for the purpose of obtaining the circular dimensions and the characters are shown in Figure 2. According to the ratio of the camera results obtained under different light intensities to the ratio of the circle diameters, the exposure time of the light source was determined as 10,000 milliseconds (ms).



**Figure 2.** Visual results of the camera: (a) result image of setting exposure time as 7 ms, (b) exposure time as 10 ms, (c) exposure time as 12 ms, (d) exposure time as 15 ms

In cases where the light intensity is less than or equal to 7 ms, the edge contours of the circular metal objects appear to be better, but the appearance of the characters becomes very fuzzy, and the character area detection problem is not successful. In the case of a light intensity of 15 ms and above, but the character contour of the circle appears to be better, and the contour of the circular metal objects becomes more blurred. The main purpose of the detection of edge contours is that the character region must be very specific in order to obtain an efficient result to applied of MSER algorithm. Therefore, the images obtained in the visual results of the camera, as seen in Figure 2, should be cut out of the character area in the most inner circle, and the non-character regions should be eliminated by visual exclusion. In the section Finding the circle diameters, which are preprocessed for the determination of the character region.

### Finding circle diameters - solving localization problem

Grayscale images of 800x600 pixels were prepared and the necessary steps were taken to find the circular diameters of circular metal objects in Appendix shown as Figure 1.

Firstly, the input image was softened and the noise on the image was tried to be reduced and the Laplace of Gaussian (LoG) (Marr and Hildreth, 1980) filter was used to sharpen the edge contours of the circular metal object in the image. LoG filter pixels are calculated with the following equation.

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

In equation (1), where  $(x, y)$  are pixels of input images,  $\sigma$  is standard deviation value. Set  $\sigma = 0.4$  value of Gaussian Filter, Laplacian Filter is applied to calculate the edge information in the image.

Secondly, using the Canny edge detection algorithm to apply the image to the LoG filter, the edge contours of the image are detected. Canny edge pixels are calculated with the following equations.

$$SNR = \frac{A \left| \int_{-w}^0 f(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x) dx}} \quad (2a)$$

$$Localization = \frac{A |f(0)|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2 dx}} \quad (2b)$$

$$k = SNR * Localization \quad (2c)$$

$$k = R_{ij}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} SNR(x) Localization(x + \tau) dx \quad (2d)$$

$$R_{ij}(x) = LoG(x, y) e^{\left(-\frac{x^2}{4\sigma^2}\right)} \quad (2e)$$

In equation (2a), where  $f(x)$  is convolution filter for noise reduction and edge pixels,  $-W, W$  is edge pixels,  $A$  is amplitude of applied each step,  $n$  is the derivative number of the delta function,  $SNR$  indicates the output signal-to-noise ratio (error rate) of the edge finding operator. The high  $SNR$  value indicates that there is more signal at the output function and less noise at the same time.

In equation (2b), where  $Localization$  represents the equivalent of the actual edge pixel position, the distance between the placed pixel position of the filter. The  $Localization$  value indicates that the distance between the actual edge pixel positions is small.

In equation (2c), where  $k$  represents convolution multiplication of  $SNR$  and  $Localization$  values.

In equation (2d) presented convolution multiplication in equation (2c), where  $i$  and  $j$  are pixel values in Cartesian coordinates,  $R$  indicates the output values. Obtained result of  $k$  has value with high complexity that can be reverted the first derivative of the Gaussian function.

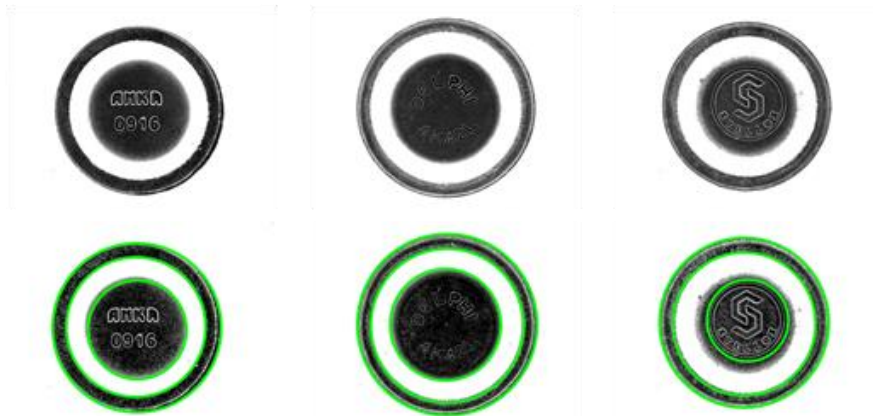
In equation (2e) The edge map containing the gradient amplitude values obtained, *non-maximum suppression* (Canny, 1986) technique is applied to eliminate extracellular pixels.

The Hough Transform (Hough, 1962) algorithm developed as the edge detection algorithm, and Circular Hough Transform (CHT) (Ylajaaski and Kiryati, 1994; Lam and Yuen, 1996) algorithm was used to detect circular contours according to the pixel relations within the image. In the mathematical expression given in Appendix shown as Figure 1. The central coordinates and radius pixel values were found for each of the three circles obtained on the image. The circular contours coordinates were plotted on the image as shown as Figure 3. And the circle representations were performed, and the values of  $Q1, Q2, Q3$  was found in row 16 of by using the *ratio* value (pixel - mm conversion) in row 5 in the Appendix shown as Figure 1. For results of  $Q1, Q2, Q3$  see Table 1.

**Table 1.** Circle diameters determined after CHT algorithm

| Sample Name | Q1       | Q2       | Q3       | t       | p        |
|-------------|----------|----------|----------|---------|----------|
| ANKA        | 33 mm    | 27.26 mm | 19.24 mm | 3,000 s | 98.70 %  |
| DELPHI      | 35.40 mm | 30.06 mm | 21.78 mm | 3.14 s  | 98.27 %  |
| STELLOX     | 33.13 mm | 27.92 mm | 15.90 mm | 2.92 s  | 99,000 % |
| 4U          | NaN      | 22.45 mm | 22.45 mm | 2.44 s  | 96.30 %  |
| A1016       | 28.59 mm | 24.45 mm | 18.44 mm | 2.69 s  | 95.42 %  |
| HEARTH      | NaN      | 22.45 mm | 22.45 mm | 2.39 s  | 97.48 %  |
| WONGA       | 30.33 mm | 30.46 mm | 16.30 mm | 2.50 s  | 98.58 %  |
| S11S45      | 38.21 mm | 26.45 mm | 18.17 mm | 3.52 s  | 99.18 %  |
| 1118        | 38.48 mm | 26.45 mm | 16.97 mm | 3.72 s  | 98.73 %  |
| METZGER     | 38.21 mm | 26.72 mm | 18.70 mm | 3.70 s  | 99.10 %  |
| APLUS       | 29.26 mm | 29.56 mm | 18.57 mm | 2.89 s  | 98.59 %  |

In Table 1, as a result of the application of the CHT algorithm, circular metal objects show the circle diameters.  $Q1$  represents the outer diameter,  $Q2$  is the middle diameter, and  $Q3$  represents the inner diameter.  $t$  is the fixing process time and  $p$  is the accuracy ratio. NaN expressions donates the circle cannot be determined,  $Q3$  results of 4U and HEARTH samples and APLUS  $Q1$  result are shown incorrectly.



**Figure 3.** Circular Hough Transform (CHT) Results: For the determination of circle diameters, the CHT algorithm was used to determine the 3 circle positions (bottom)

### Image normalization and feature extraction

Once the circle diameters have been detected, the remaining character region within the smallest circle diameter ( $Q_3$ ) area is cut off from the main image. The problem of character segmentation and character segmentation of the cut image is simplified. Two different approaches have been introduced for character region extraction. Daugman's Rubber Sheet Model (DRSM) is used in this approach to align, normalize characters in a circular alignment. An approach developed by Daugman has developed a pattern matching method using the human eye for human recognition in the object classification problem. Normalized operation that is DRS model applied to images selected for circular alignment of characters. DRS model pixels are calculated with the following equations.

$$I(x, y) \rightarrow I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta) \quad (3a)$$

$$x(r, \theta) = (1 - r)x_p(\theta) + rx_s(\theta) \quad (3b)$$

$$y(r, \theta) = (1 - r)y_p(\theta) + ry_s(\theta) \quad (3c)$$

$$DRS(x, y) = I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \quad (3d)$$

In equation (3a), where  $I(x, y)$  is Cartesian coordinate plane image,  $x(r, \theta)$  and  $y(r, \theta)$  indicate the polar coordinate plane. Circles in the Cartesian coordinate plane of  $r$  and  $\theta$ , and indicates  $I(r, \theta)$  representations in the polar coordinate plane.

In equation (3b) and (3c), where  $x_p(\theta)$  and  $y_p(\theta)$  are bottom edge pixel points of the characters set for the image warping, so that the character region will not be exposed,  $x_s(\theta)$  and  $y_s(\theta)$  are denotes the pixel points of the outer diameters of the smallest circle cut.

In equation (3d), the pixel points of the normalized coordinate plane obtained are  $DRS(x, y)$ .

For  $x_p(\theta)$  and  $y_p(\theta)$  pixel points, 30 pixels less than the radius of the smallest circle is given. Because the exactly character region is a little inner zone of the smallest circle, see in Figure 3.  $x_s(\theta)$  and  $y_s(\theta)$  pixel points are the center point of the smallest circle. The most inner circle region has been extended from frame resolution (Sample Name = DELPHI - 327x327) to a resolution of 99x750 after normalization. Normalized images created with re-determined pixel points  $DRS$  for the Cartesian image of the polar image, and the next stage is made available for feature extraction. Obtained DRSM images as shown in Figure 4 (b).

For feature extraction process, sing that texture analysis (Turner, 1986), specific band-pass channels and spatial frequencies (Havlicek *et al.*, 1997) such a given parameters by Gabor Filter (GF). GF is applied on DRSM image pixels with the following equations.

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4a)$$

$$y' = y \cos \theta - x \sin \theta \quad (4b)$$

$$G(x, y; \theta, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x'^2}{\delta_x^2} + \frac{y'^2}{\delta_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi f x') \quad (4c)$$

In equation (4a) and (4b), where  $x'$  and  $y'$  are the radian values of the input image pixel values,  $\theta$  is angle value to which the filter will be applied.

In equation (4c),  $f$  is wavelength (frequency - cycles/degree),  $\delta$  values are contrast deviation,  $G(x, y)$  is magnitude frame of GF after applied GF,  $G(\theta, f)$  is denotes phase frame of GF after applied GF.

In this study, when applying GF that parameters has been identified as  $f = 2, 4, 8, 16, 32$ , and  $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ . In practice, the best results are obtained from the sources of (Tan, 1995; Lee, 1996; Clausi and Jernigan, 2000) for the obtained frequency and  $\theta$  constants. Phase images of GF used for pattern and texture factors in feature extraction (Oppenheim *et al.*, 1983; Scott T. Acton *et al.*, 2001; Tisse *et al.*, 2002). Obtained phase frames as shown in Figure 4 (d)(e)(f)(g)(h).

Phase images were created for each sample with 20 different  $f$  frequencies and 4 different  $\theta$  angle values and totally 220 items for 11 sample images. The color density range of the phase images obtained after the GF was determined as -3.14 to 3.14, and the "0" and "1" values that should be used for pattern matching were converted to the logical values and the Mean Absolute Deviation (MAD) algorithm was applied to the phase images to minimize the depreciation (Ma *et al.*, 2002). MAD algorithm is calculated the GF phase pixels with the following equations.

$$MAD(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{\theta, f=1}^N |G(\theta, f) - \text{mean}(G(\theta, f))| \quad (5a)$$

$$\sigma = 1.253 \times OMS(x, y) \quad (5b)$$

$$MAD'(x, y) = G(\theta, f) \times \sigma \quad (5c)$$

In equation (5a), (5b) and (5c), where  $x$  and  $y$  are pixel values of the phase image,  $N$  is sum of pixel values,  $\sigma$  is a constant used to normalize the image of  $MAD(x, y)$ ,  $G(\theta, f)$  is phase frame of GF,  $MAD'(x, y)$  is obtained output image. The pixel values of the obtained phase images after MAD that if less than "0" is "0", if rather than "0" is "1", and obtained binary image to thresholding the MAD image as these conditions. Obtained for binary images as shown in Figure 4 (i).

In order to shorten the processing time for pattern matching, the image information has been reduced from 99x750 - 74250 pixel to 10x75 - 750 pixels. Resized images were indexed in a single alignment and added to the database at 1x750 resolution, then matched. Sample name and index number are also uploaded to the database.

### XOR pattern matching

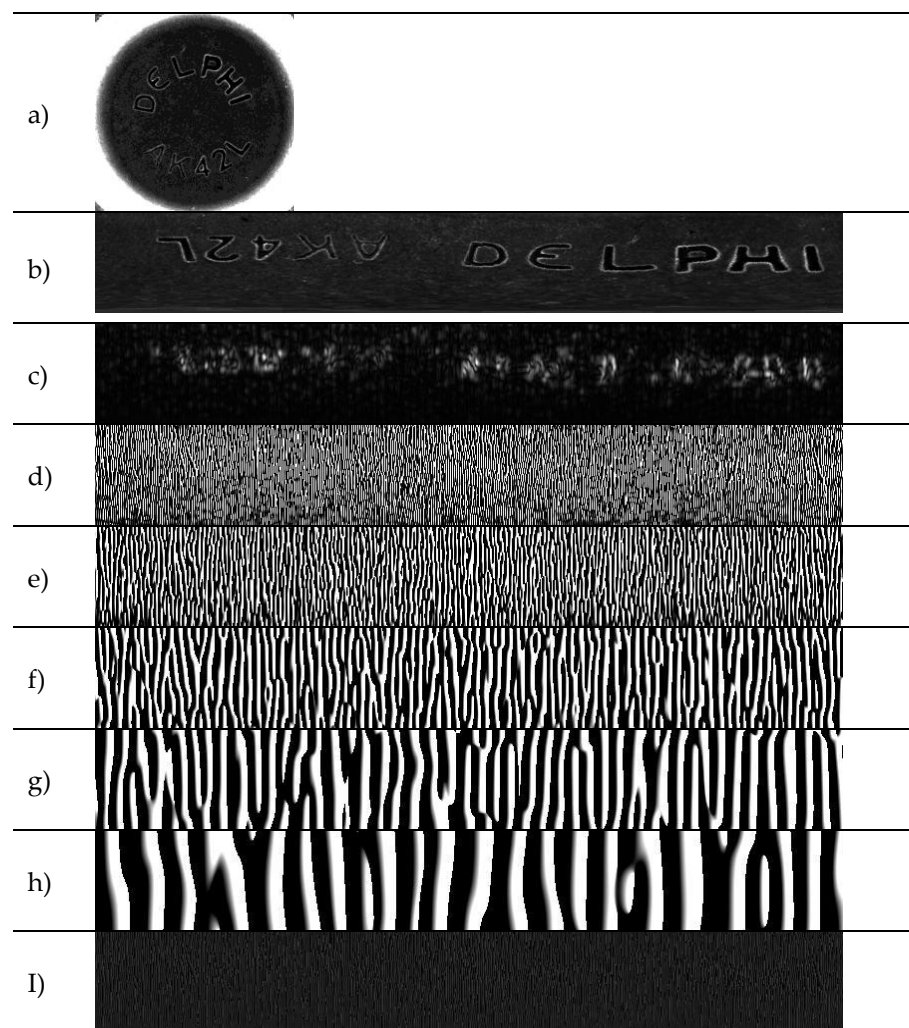
The XOR logic operator is a very useful and fast way to match the "0" response given by the same binary values (Zhang *et al.*, 2010; Bala and Tajinder, 2016). XOR operator calculating the matching with the following equations.

$$S = \sum_{i=1}^N A_i \oplus B_i \quad (6a)$$

$$\alpha = \frac{1}{N} \times S(0) \quad (6b)$$

In equation (6a), where  $i$  is pixel index of matching image and image in database,  $N$  is sum of index number,  $A$  is matching image,  $B$  is image in database,  $S$  is obtained image after XOR operator process.

In equation (6b), where  $S(0)$  is sum of binary pixels "0" values of the obtained image,  $\alpha$  donates the rate of matching. The application results consist of matching rate, DRSM, GF and XOR operator process time are shown in Table 2.



**Figure 4.** (a) Cut off view the inner circle area, (b) Normalized image as Daugman's Rubber Sheet Model with reduce 30 pixels, (c) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 2$  magnitude frame, (d) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 2$  phase frame, (e) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 4$  phase frame, (f) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 8$  phase frame, (g) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 16$  phase frame, (h) GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 32$  phase frame, (i) MAD feature extraction image after applied GF  $\theta = 0$ ,  $\sigma = 2$  phase frame

**Table 2.** XOR pattern matching results and all process time

| Sample Name | DRSM time | GF time | XOR time | Match Ratio |
|-------------|-----------|---------|----------|-------------|
| ANKA        | 27 ms     | 4 ms    | 37 ms    | 0.932687    |
| DELPHI      | 34 ms     | 4 ms    | 38 ms    | 0.894114    |
| STELLOX     | 22 ms     | 3 ms    | 39 ms    | 0.960512    |
| 4U          | 39 ms     | 4 ms    | 39 ms    | 0.963340    |
| A1016       | 27 ms     | 4 ms    | 39 ms    | 0.876377    |
| HEARTH      | 35 ms     | 4 ms    | 39 ms    | 0.965684    |
| WONGA       | 22 ms     | 3 ms    | 37 ms    | 0.932081    |
| S11S45      | 24 ms     | 4 ms    | 38 ms    | 0.962653    |
| 1118        | 23 ms     | 3 ms    | 38 ms    | 0.955879    |
| METZGER     | 27 ms     | 4 ms    | 38 ms    | 0.931286    |
| APLUS       | 27 ms     | 3 ms    | 38 ms    | 0.963246    |

In the algorithms applied to the XOR pattern matching method, the processing times and matching ratios of the sample products are indicated. DRSM time specifies the processing time for the Daugman's model, GF Time is the processing time for the Gabor Filter applied for feature extraction, XOR time is the processing time for the pattern matching, and the Match Ratio is refers to rate of matching after XOR operator process.

### Classification with optical character recognition

The second proposed method is OCR approach to use CNN from the deep machine learning classes for character recognition and circular metal object classification problem (Bell and Sejnowski, 1997; LeCun *et al.*, 1998; Connell and Jain, 2001; Hinton *et al.*, 2006; Keysers *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009; Krizhevsky *et al.*, 2012; LeCun *et al.*, 2015; Jailin Reshma *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2017). Before the CNN is performed, the process of repeating the character region within the inner circle is repeated. The presence of the circle diameters which are the pretreatment for the detection of the character zone is described in the Finding Circle Diameters section. Secondly, MSER and SWT algorithms to be applied respectively on the inner circle to detect character region and segmentation of characters. Lastly, CNN algorithms to be applied segmented character images for character recognition.

### Maximally stable extremal region implementation

The second step is contrast enhancement sharpen filter was used to better characterize the character region after the pre-processing of character-zone detection, and to sharpen the characters in the image (Kocer and Cevik, 2011). In the resulting image, the contrast of the character edge pixels is increased and the usefulness of the character area detection and segmentation is increased and it is introduced in Figure 5 (b). The third step is for the detection of the character region is the algorithm for MSER from the blob coloring methods (Salembier and Garrido, 2000; Mikolajczyk *et al.*, 2005; Donoser and Bischof, 2006). For MSER, the image was first converted to a binary image with a thresholding is 63 best found value. Then, the MSER algorithm marks possible character edge contours by blocking non-character zones with MSER blob extraction between binary pixels. The character region with these marked pixel points is enclosed in the bounding box as shown in Figure 5 (c).

### Stroke width transform implementation

As shown in Figure 5 (c), it is marked in some non-character regions. In order to get rid of this situation, SWT algorithm was used to eliminate the non-character regions. SWT uses contour-width information of characters to eliminate contour-width information that is more or less than this information in the image. SWT algorithm is calculated with the following equations.

$$r = p + \sum_{p=1}^N n d_p \quad (7a)$$

$$d_q = -d_p \pm \frac{\pi}{6} \quad (7b)$$

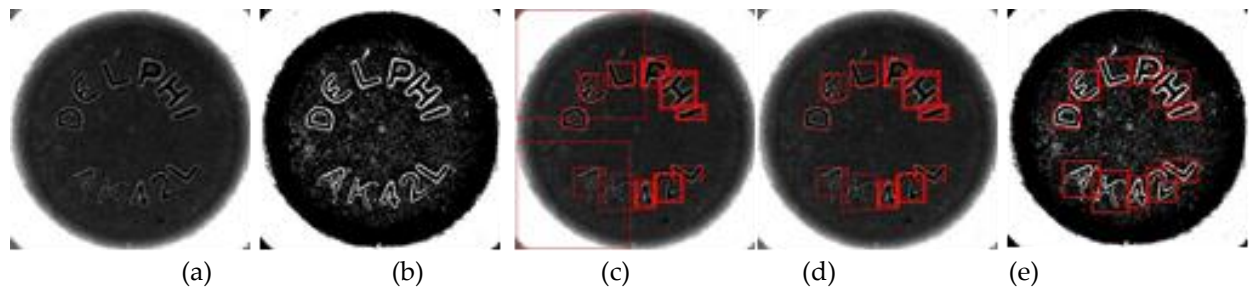
$$s = p - q \quad (7c)$$

In equation (7a), (7b) and 7(c), where  $p$  is inner contour pixel of character,  $N$  is sum of pixel values of  $p$ ,  $n$  is number of iterations,  $d_p$  and  $d_q$  are directions of gradient,  $q$  is the outer contour pixel of the character,  $s$  denotes the width. The non-character regions are sifted with obtained character pixel contours and the character's regions are re-marked after SWT and it is introduced in Figure 5 (d). In the character areas marked, some of characters have been marked several times. A series of matrix operations have been performed for this problem. These matrix operations, respectively, eliminate the same coordinate and eliminate the sum of  $x$ ,  $y$  coordinate the difference sum of  $x + 1$ ,  $y + 1$  coordinate totals if the difference is less than 10 pixels. The mathematical model of Matrix operations is shown in equation (8).



$$bbox(x, y) = \begin{cases} \sum_{x,y=1}^N x, y = \sum_{x,y=2}^{N-1} x, y & , \text{ if equality is 0} \\ \sum_{x,y=1}^N |(x + y) - (x + 1, y + 1)| \leq 10 & , \text{ if equality is 0} \end{cases} \quad (8)$$

In equation (8), where  $x, y$  are detected character contour coordinates,  $N$  is sum of coordinates, a constant of 10 is a constant value for repeated character contour points and  $bbox$  is marked edge counter coordinates. Character coordinates of the character contour after SWT are normalized with this formula, and the character regions are re-marked as shown in Figure 5 (e). The problem of detection character region and character segmentation problem is solved with these normalized coordinate values and the characters are prepared for the problem of character recognition.



**Figure 5.** (a) Cut off view the inner circle area, (b) sharpen filter image applied for contrast enhancement, (c) character regions results determined by MSER, (d) character regions results determined by SWT, (e) character region results obtained by normalizing the character coordinates

### Convolutional neural networks implementation

In the character images prepared, the CNN of deep learning class was applied to the methods which are frequently used for the object classification problem. The CNN model is designed based on character dimensions and character positions within an image, also shown in Figure 6. For 3 Convolution layers, 32, 32 and 64 filters were applied respectively from the  $3 \times 3$  matrix. For 3 MaxPooling layers *stride* value is 2. Obtained 36 class type with 1 Flatten layer and softmax layer. Used Relu (Qian *et al.*, 2018) as activation function and Adam (Kingma and Ba, 2015) as optimization function.

For the training of the model, some of the images obtained in SWT were reproduced such as binary inversion, inversion in x and y axes, rotation, noise addition, histogram equalization, adaptive histogram equalization, image density values. In another part, EMNIST (Cohen *et al.*, 2017) letters data set was used. 36000 training images, 9000 verification images, each 1000 characters, were used for 36 characters. The model training was set as 10 epochs and a total of 2810 iterations were applied. As a result of the training that obtained minimum validation loss was found to be 0.088, accuracy was 97.76 % and validation accuracy was 97.66 %. Graphs of the training process including accuracy percentages and loss rates are shown in Figure 7. Character images are passed through the trained model have been solved the classification problem of circular metal objects by the OCR approach. The prediction results of character recognition as shown in Figure 8. For character recognition processing time, see Table 3

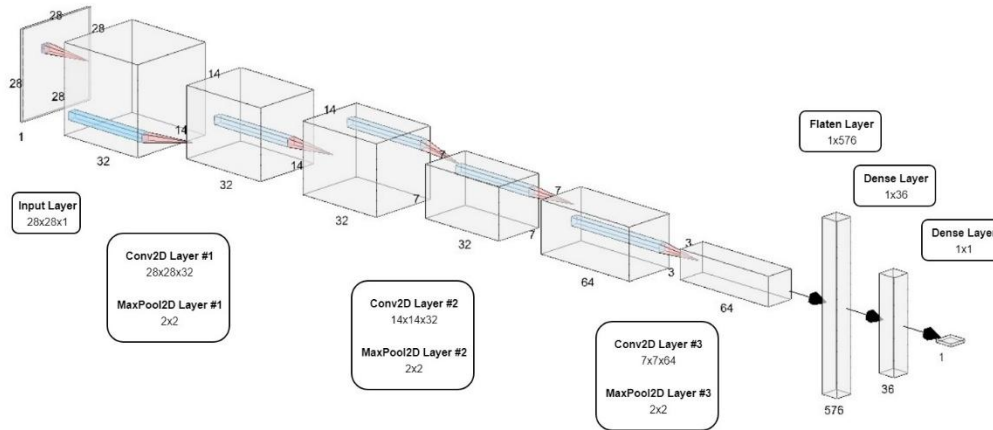


Figure 6. The isotropic view of designed CNN model

Table 3. The process times of after applied OCR algorithms

| Sample Name | MSER time | SWT + n* time | OCR time |
|-------------|-----------|---------------|----------|
| ANKA        | 767 ms    | 358 ms        | 511 ms   |
| DELPHI      | 672 ms    | 167 ms        | 507 ms   |
| STELLOX     | 1393 ms   | 207 ms        | 477 ms   |
| 4U          | 1288 ms   | 133 ms        | 456 ms   |
| A1016       | 427 ms    | 178 ms        | 504 ms   |
| HEARTH      | 1170 ms   | 154 ms        | 525 ms   |
| WONGA       | 4581 ms   | 99 ms         | 461 ms   |
| S11S45      | 1093 ms   | 161 ms        | 468 ms   |
| 1118        | 880 ms    | 61 ms         | 504 ms   |
| METZGER     | 1009 ms   | 103 ms        | 513 ms   |
| APLUS       | 1055 ms   | 321 ms        | 461 ms   |

In Table 3, the algorithms applied for the OCR process and their processing times are available. The  $n^*$  represents the matrix normalized processing time applied to the characters region coordinates after SWT.

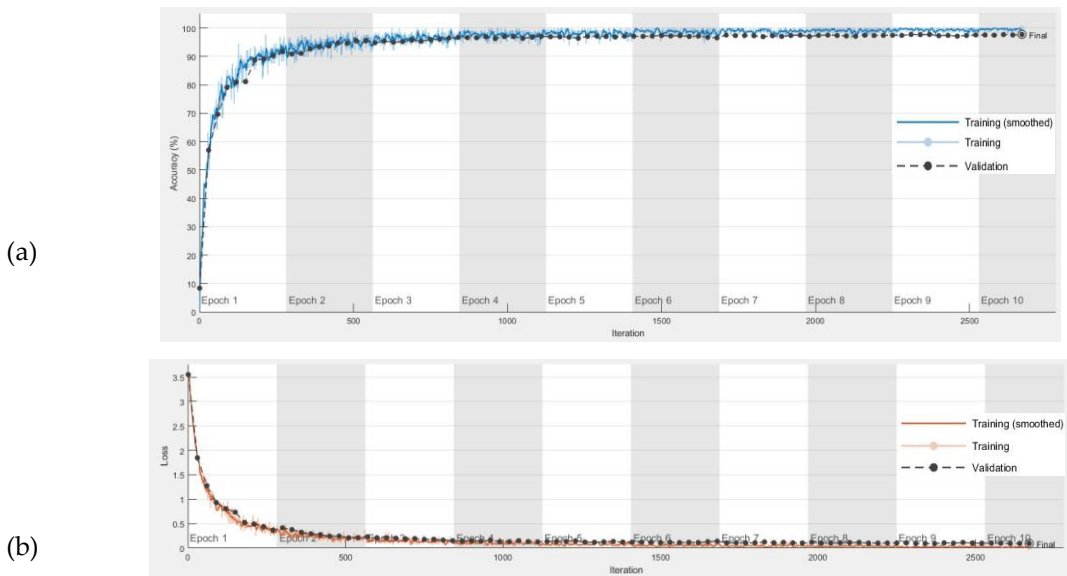
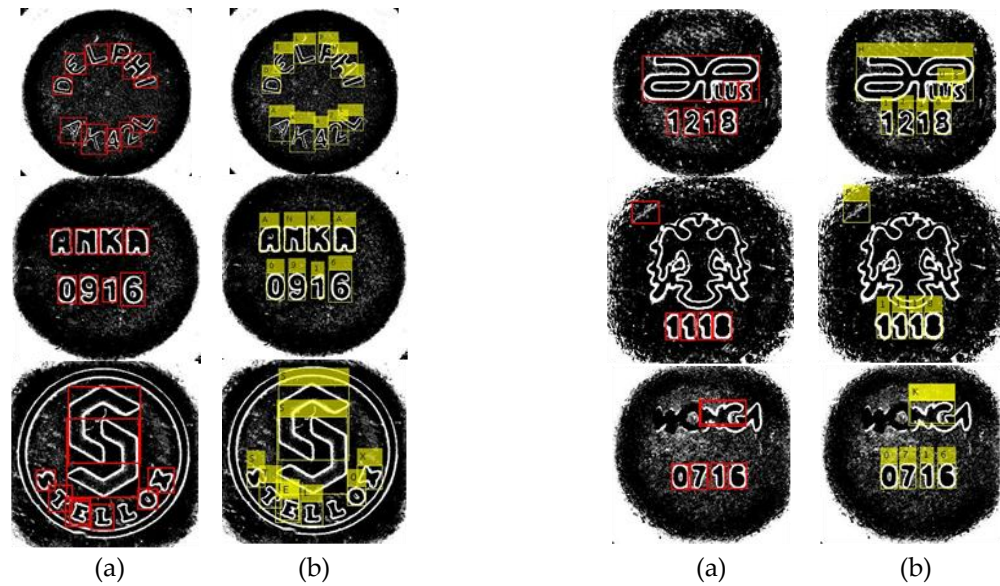


Figure 7. In the process of training (a) increasing accuracy percentage and validation accuracy percentage changes, (b) shows the change in decreasing verification rates



**Figure 8.** (a) The result of character segmentation of images normalized after SWT, (b) the result of OCR, characters have been detected by the CNN algorithm.

#### DATASET AND PERFORMANCE HARDWARE

For the sampling images of industrial products of circular metal objects, the Cognex brand IS7010 model scanning camera and the 35mm C-mount Lens were used. By In-Sight Explorer program with 800x600 resolution grayscale images were obtained. The data sets of EMNIST and reproducing from the obtained images are uses in order to train the CNN model.

In the scope of the study, Intel i7 4720HQ 2.6GHz CPU, 16GB 2133MHz RAM used and NVidia GTX960 2GB RAM GPU hardware was used to train CNN model. The processing times of the whole applied algorithms, which are mentioned in the tables, were obtained with the specified hardware and the programming phase of the study was developed in Matlab R2018a software.

#### RESULTS AND DISCUSSIONS

As shown as Figure 8, The characters on the circular metal objects are engraved and, since they do not have a different background, the fact that some characters are in very different fonts and that some characters are very adjacent make difficult the OCR problem. However, the MSER algorithm is quite successful when some characters on circular metal objects are not contiguous with one another and have sufficient font size. After successful character segmentation yielded successful character recognition results as shown in Figure 8.

**Table 4.** Comparison of proposed methods

| Applied Methods             | Average Processing Time | Accuracy Rates |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|
| Finding Circle Dimensions   | 2.99 s                  | 0.9812         |
| XOR Pattern Matching Method | 69.72 ms                | -              |
| OCR Method                  | 1.596 s                 | 0.9719         |

Table 4 shows the processing times and accuracy of the proposed methods for the classification of circular metal objects. In both methods, the determination of the localization or find the diameter of the circles was applied as a preliminary stage. Accordingly, the processing time for the XOR pattern matching method lasts approximately 3.059 seconds in total, while the OCR method takes a total of 4.586 seconds. If compiled with C++ or Python languages, processing times are expected to decrease. In

addition, in the case of processing on the GPU core with opencv or emgucv libraries will significantly reduce the processing times.

## CONCLUSIONS

The XOR pattern matching and OCR solutions applied for the classification problem of circular metal objects with engraved characters are presented in the tables. Although the XOR pattern matching solution is much faster than the OCR method, but decreases the accuracy of matching ratio, such as the change of character sizes, the formation of a camera image with a different angle of circular metal objects. Although the MSER and SWT algorithms applied at the preliminary stage for the OCR method took much time in terms of processing time, they gave successful results for the segmentation of the characters and the character regions. The accuracy of the CNN model applied to the OCR in the final stage was 97.66%, and it achieved a high level of success in the visualization where character area detection is done correctly. The main points of this thesis result is classify the circular metal objects in separation section and also, control and verification the accuracy of characters after pressing process in quality control section. Besides that, it is contributed that XOR pattern matching can be used for classification of engraved material and also MSER and SWT algorithms are successful on solution of character recognition problem of engraved materials. For the classification problem of circular metal objects, the success of the OCR solution is proposed, given the factors such as camera visualization of the products at a different angle, the potential for a wide range of products that can be increased or changed, the realization of new products' feature extraction for XOR template matching, and the increasing work-time process.

## SYMBOLS

$\sigma$  : sigma,  $\tau$ : tav,  $\theta$ : theta,  $\delta$  : delta,  $f$ : frequency

## APPENDIX

---

**Algorithm 1** Applied Algorithms for Circle Detection

---

**Input:** grayscale images in  
**Output:** diameters of circle out

*Initialisation :*

- 1: Laplacian of Gaussian Filter
- 2: Canny Edge Operator
- 3: Circular Hough Transform

*LOOP Process - circular pixel voting*

- 4:  $count \leftarrow 0, I(x, y), r \in rmin \wedge rmax, 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$
- 5:  $ratio \leftarrow (0.1 * 33.0) / 49.40$
- 6: **for**  $x$  to  $y$  **do**
- 7:   **for**  $rmin$  to  $rmax$  **do**
- 8:     **for**  $\thetamin$  to  $\thetamax$  **do**
- 9:        $a \leftarrow x - r * \cos(\theta * \pi / 180)$
- 10:        $b \leftarrow y - r * \sin(\theta * \pi / 180)$
- 11:        $count \leftarrow count + 1$
- 12:        $I(a, b, r) \leftarrow count$
- 13:     **end for**
- 14:   **end for**
- 15: **end for**
- 16:  $Q1 \leftarrow (r1 * 2) * ratio$
- 17:  $Q2 \leftarrow (r2 * 2) * ratio$
- 18:  $Q3 \leftarrow (r3 * 2) * ratio$
- 19: **return**  $Q1, Q2, Q3$

---

**Figure 1.** Algorithm 1 shows applied whole algorithms for detection and measure dimensions of circles

**Algorithm 2** Applied Algorithms for XOR Pattern Matching

---

**Input:** inner circle area image in  
**Output:** pattern matching rate out

*Initialisation :*  
 Daugman's Rubber Sheet Model

2: Gabor Filter  
 Mean Absolute Deviation

4: XOR Operate  
*LOOP Process - XOR  $\oplus$*   
 $A_i \leftarrow I(x, y), B_i \leftarrow \text{database image } (x, y), \text{count} \leftarrow 0$

6: **for**  $i$  to size of  $A_i$  **do**  
      $A_i \oplus B_i$

8:     **if** (result of  $\oplus = 0$ ) **then**  
         $\text{count} += 1$

10:    **end if**

**end for**

12: result of zero rate  $\leftarrow \text{count} \div \text{size of } B_i$   
**return** result of zero rate

---

**Figure 2.** Algorithm 2 shows applied whole algorithms in order to make XOR pattern matching after detection Q3 inner circle

**REFERENCES**

- Bala, A. and Tajinder, K., 2016, Local texton XOR patterns: A new feature descriptor for content-based image retrieval, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 (1), 101-112.
- Bell, A. J. and Sejnowski, T. J., 1997, The Independent Components of Natural Scenes are Edge Filters, *Vision Research*, 37 (23), 3327-3338
- Canny, J., 1986, A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8 (6), 679-698.
- Chapelle, O., Haffner, P. and Vapnik, V. N., 1999, Support vector machines for histogram-based image classification, *Ieee Transactions on Neural Networks*, 10 (5), 1055-1064.
- Chawla, S. and Oberoi, A., 2011, A Robust Algorithm for Iris Segmentation and Normalization using Hough Transform, *Global Journal of Business Management and Information Technology*, 69-76.
- Clausi, D. A. and Jernigan, T. E., 2000, Designing Gabor filters for optimal texture separability, *Pattern Recognition*, 33 (11), 1835-1849.
- Cohen, G., Afshar, S., Tapson, J. and van Schaik, A., 2017, EMNIST: an extension of MNIST to handwritten letters, *Internaltional Joint Conference On Neural Networks (IJCONN)*, 2921-2926.
- Connell, S. D. and Jain, A. K., 2001, Template-based online character recognition, *Pattern Recognition*, 34 (1), 1-14.
- Dalal, N. and Triggs, B., 2005, Histograms of Oriented Gradients for Human Detection, *Proceedings - 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2005*, 1 (1), 886-893.
- Daugman, J., 1997, Neural image processing strategies applied in real-time pattern recognition, *Real-Time Imaging*, 3 (3), 157-171.
- Daugman, J., 2003, The importance of being random statistical principles of iris recognition, *Pattern Recognition*, 36, 279-291.
- Donoser, M. and Bischof, H., 2006, Efficient Maximally Stable Extremal Region (MSER) Tracking, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1, 553-560.
- Epshtein, B., Ofek, E. and Wexler, Y., 2010, Detecting Text in Natural Scenes with Stroke Width Transform, *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2963-2970.

- Fukushima, K., 1980, Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position, *Biological Cybernetics*, 36 (4), 193–202.
- Gabor, D., 1946, Theory of communication. Part 3: Frequency compression and expansion, *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering*, 93 (26), 445–457.
- Gonzalez, A., Bergasa, L. M., Yebes, J. J. and Bronte, S., 2012, Text Location in Complex Images, *21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2012)*, 617–620.
- Hanif, S. M. and Prevost, L., 2009, Text Detection and Localization in Complex Scene Images using Constrained AdaBoost Algorithm, *10th International Conference on Document Analysis and Recognition*, 1–5.
- Havlicek, J. P., Havlicek, J. W. and Bovik, A. C., 1997, The analytic image, *Proceedings of International Conference on Image Processing*, 446–449.
- He, K., Gkioxari, G., Dollar, P. and Girshick, R., 2017, Mask R-CNN, *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 1, 2980–2988.
- Heikkila, M., Pietikainen, M. and Schmid, C., 2009, Description of interest regions with local binary patterns, *Pattern Recognition*, 42 (3), 425–436.
- Hinton, G. E., Osindero, S. and Teh, Y. W., 2006, A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets, *Neural Computation*, 18 (7), 1527–1554.
- Hough, P. V. C., 1962, General Purpose Visual Input for a Computer, *Brookhaven National Laboratory, Upton, N. Y.*, 99, 323–334.
- Huizhong, C., Tsai, S. S., Schroth, G., Chen, D. M., Grzeszczuk, R. and Girod, B., 2011, Robust text detection in natural images with edge-enhanced maximally stable extremal regions, *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP*, 2609–2612.
- Jailin Reshma, A., Jenushma James, J., Kavya, M. and Saravanan, M., 2016, An overview of character recognition focused on offline handwriting, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (15), 9372–9378.
- Keyzers, D., Deselaers, T., Gollan, C. and Ney, H., 2007, Deformation models for image recognition, *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 29 (8), 1422–1435.
- Kingma, D. P. and Ba, J. L., 2015, Adam: A method for stochastic gradient descent, *ICLR: International Conference on Learning Representations*.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G. E., 2012, ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks, *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*, 1097–1105.
- Kocer, H. E. and Cevik, K., 2011, Artificial neural networks based vehicle license plate recognition, *Procedia Computer Science*, 3, 1033–1037.
- Lam, W. C. Y. and Yuen, S. Y., 1996, Efficient technique for circle detection using hypothesis filtering and Hough transform, *Iee Proceedings-Vision Image and Signal Processing*, 143 (5), 292–300.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P., 1998, Gradient-based learning applied to document recognition, *Proceedings of the IEEE*, 86 (11), 2278–2324.
- LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G., 2015, Deep learning, *Nature*, 521 (7553), 436–444.
- Lee, H., Grosse, R., Ranganath, R. and Ng, A. Y., 2009, Convolutional Deep Belief Networks for Scalable Unsupervised Learning of Hierarchical Representations, *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning - ICML '09*, 609–616.
- Lee, T. S., 1996, Image representation using 2D gabor wavelets, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (10), 959–971.
- Li, Y. and Lu, H., 2012, Scene Text Detection via Stroke Width, *Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012)*, 681–684.
- Long, J., Shelhamer, E. and Darrell, T., 2015, Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*: 3431–3440.
- Ma, J., Shao, W., Ye, H., Wang, L., Wang, H., Zheng, Y. and Xue, X., 2018, Arbitrary-Oriented Scene Text Detection via Rotation Proposals, *IEEE Transactions on Multimedia*, 20 (11), 3111–3122.

- Ma, L., Wang, Y. and Tan, T., 2002, Iris recognition based on multichannel Gabor filtering. Proceedings of the International Conference on Asian Conference on Computer Vision: 279--283.
- Marr, D. and Hildreth, E., 1980, Theory of Edge-Detection, *Proceedings of the Royal Society Series B-Biological Sciences*, 207 (1167), 187-217.
- Matas, J., Chum, O., Urban, M. and Pajdla, T., 2004, Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions, *Image and Vision Computing*, 22 (10), 761-767.
- Mikolajczyk, K., Tuytelaars, T., Schmid, C., Zisserman, A., Matas, J., Schaffalitzky, F., Kadir, T. and Gool, L. V., 2005, A Comparison of Affine Region Detectors, *International Journal of Computer Vision*, 65 (1-2), 43-72.
- Müller, K. R., Mika, S., Ratsch, G., Tsuda, K. and Scholkopf, B., 2001, An Introduction to Kernel-Based Learning Algorithms, *Ieee Transactions on Neural Networks*, 12, 181-201.
- Neumann, L. and Matas, J., 2012, Real-Time Scene Text Localization and Recognition, *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3538-3545.
- Ojala, T., Pietikainen, M. and Harwood, D., 1996, A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions, *Pattern Recognition*, 29 (11), 51-59.
- Oppenheim, A. V., Lim, J. S. and Curtis, S. R., 1983, Signal Synthesis and Reconstruction from Partial Fourier-Domain Information, *Journal of the Optical Society of America*, 73 (11), 1413-1420.
- Pratt, W. K., 2001, Digital Image Processing: PIKS Inside, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA, 3rd edition, 590-595.
- Qian, S., Liu, H., Liu, C., Wu, S. and Wong, H. S., 2018, Adaptive activation functions in convolutional neural networks, *Neurocomputing*, 272, 204-212.
- Redmon, J. and Farhadi, A., 2017, YOLO9000: Better, Faster, Stronger, *30th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2017*, 6517-6525.
- Redmon, J. and Farhadi, A., 2019, YOLOv3: An Incremental Improvement, *CoRR*.
- Salembier, P. and Garrido, L., 2000, Connected operators based on region-tree pruning strategies. Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000: 367-370.
- Schapire, R. E. and Singer, Y., 1999, Improved boosting algorithms using confidence-rated predictions, *Machine Learning*, 37 (3), 297-336.
- Scott T. Acton, P. Havlicek and Alan Conrad Bovik, 2001, Oriented Texture Completion by AM-FM Reaction-Diffusion, *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, 10 (6), 885-896.
- Shivakumara, P., Phan, T. Q. and Tan, C. L., 2011, A Laplacian Approach to Multi-Oriented Text Detection in Video, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33 (2), 412-419.
- Subrahmanyam, M., Wu, Q. M. J., Maheshwari, R. P. and Balasubramanian, R., 2013, Modified color motif co-occurrence matrix for image indexing and retrieval, *Computers & Electrical Engineering*, 39 (3), 762-774.
- Tan, T. N., 1995, Texture edge detection by modelling visual cortical channels, *Pattern Recognition*, 28 (9), 1283-1298.
- Tian, Y., Yang, G., Wang, Z., Wang, H., Li, E. and Liang, Z., 2019, Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model, *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 417-426.
- Tisse, C., Martin, L., Torres, L. and Robert, M., 2002, Person identification technique using human iris recognition, *Proceedings of Vision Interface*, 294-299.
- Turner, M. R., 1986, Texture-Discrimination by Gabor Functions, *Biological Cybernetics*, 55 (2-3), 71-82.
- Xie, E., Zang, Y., Shao, S., Yu, G., Yao, C. and Li, G., 2018, Scene Text Detection with Supervised Pyramid Context Network, *CoRR*.
- Ylajaaski, A. and Kiryati, N., 1994, Adaptive Termination of Voting in the Probabilistic Circular Hough Transform, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 16 (9), 911-915.
- Zhang, B., Gao, Y., Zhao, S. and Liu, J., 2010, Local derivative pattern versus local binary pattern: face recognition with high-order local pattern descriptor, *IEEE Trans Image Process*, 19 (2), 533-544.

- Zhao, X., Lin, K. H., Fu, Y., Hu, Y., Liu, Y. and Huang, T. S., 2011, Text from corners: a novel approach to detect text and caption in videos, *IEEE Trans Image Process*, 20 (3), 790-799.
- Zhou, X., Yao, C., Wen, H., Wang, Y., Zhou, S., He, W. and Liang, J., 2017, EAST: An efficient and accurate scene text detector, 2642-2651.





## ÇAVUŞCUGÖL LİNYİT AÇIK OCAĞINDAKİ DURAYSIZLIKLARIN İNCELENMESİ

<sup>1</sup>Hakan ÖZŞEN , <sup>2</sup>Berk KAYGUSUZ, <sup>3</sup>Dursun KAYA

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,  
Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>hozsen@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>b.kaygusuz@cinergroup.com.tr, <sup>3</sup>dursun.kaya@hotmail.com

(Geliş/Received: 09.05.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 11.06.2019)

**ÖZ:** Maden açık ocaklarında, mühendislik çalışmaları ile oluşturulan şevlerde, karayolu ve demiryolu yarmalarında ve doğal şevlerde duraysızlık oluşması durumunda şev kaymaları oluşabilmektedir. Meydana gelen bu kaymalar yaşam kaybına, ekonomik kayıplara, geometrisi bozulan alanlara sebebiyet vermektedir. Bu sonuçların önüne geçebilmek için oluşan duraysızlıkların izlenmesi ve elde edilen sonuçlar neticesinde emniyeti artırıcı jeoteknik revizyonlar, kaya düşmesini önleyici sistemler gibi önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu çalışma, halen Türkiye Kömür İşletmeleri(TKİ) Garp Linyitleri İşletmesi'ne (GLİ) bağlı olan Ilgın-Çavuşçugöl linyit açık ocağında gerçekleştirilmiştir. Ocakta yapılan incelemeler ve denetlemeler neticesinde ocağın doğu şevinin 60 m ilerisinde bulunan Çavuşçugöl tren istasyonuna yönelimli çekme çatlakları tespit edilmiştir. Bu bölgede 112 günlük süreçte belirli aralıklarla şev hareketleri izlenmiştir. İzlemede ölçüm sistemi olarak jeodezik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda şevdeki deformasyon hareketleri değerlendirilmiştir. Ardından, bu hareketliliğe bağlı matematiksel bir eşitlik geliştirilmiştir. Geliştirilen model sonuçları ile arazi verileri arasında yüksek regresyon olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Deformasyon, açık ocak, şev duraylılığı, jeodezik ölçüm, matematiksel modelleme

### Investigation of Instability Problems in the Çavuşçugöl Open Lignite Mine

**ABSTRACT:** Slope failure may occur in slopes of open pits slopes, engineering works, highway and railway cuts and natural slopes in case of instability. These failures result in loss of life, economic losses and deterioration of the geometry. In order to prevent these undesired results, monitoring the instability on the slopes is essential. safety enhancement geotechnical revisions, rock fall prevention systems etc. must be established according to the results of monitoring studies. This study was carried out in Turkish Coal Enterprises (TKİ) Ilgın-Çavuşçugöl lignite open pit mine. As a result of the investigations and inspections conducted in the quarry, tension cracks were found. directed to Çavuşçugöl train station, which is 60 m far from the eastern slope of the quarry. Slope movements were monitored at certain intervals in a period of 112 days by using geodetic measurement method as a monitoring system. Deformation data of the slope were evaluated and a mathematical equation based on these movements was then developed. High correlation was determined between model results and real deformation data.

**Key Words:** Deformation, open pit, slope stability, geodetic measurement, mathematical modelling

### GİRİŞ(INTRODUCTION)

Şevlerin duraylılığının korunması açık ocak madenciliğinde madencilik faaliyetlerinin sağlıklı yapılabilmesi açısından büyük önem taşır. Ocak içerisinde açılan kalıcı ve üretim basamaklarındaki

şevlerin kaymasının önlenmesi için duraylılığın sağlanması gerekmektedir. Meydana gelebilecek bir şev kayması yaşamsal ve ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Buna bağlı olarak, açık ocak madencilik faaliyetlerinin yürütülmesi için en uygun şev açısının belirlenmesi güvenli bir madencilik çalışmasının yapılabilmesi için en başta gelen unsurdur. Ancak uygulanan kazı yöntemleri, şev geometrisi, depremler, yeraltı su durumu, jeolojik özellikler ve malzeme özellikleri gibi faktörler şev duraylılığını etkilemektedir (Özgenoğlu, 2005). Bu faktörler göz önünde tutularak şevlerin devamlı gözlem altında tutulması, duraylılığın bozulmasına işaret edecek belirtilerin önceden fark edilmesi açısından büyük önem arz eder. Şevlerde izleme ve kontrol etme işlemleri için farklı metotlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları jeodezik ölçümler, çekme çatlağı ve eklemlerde açılma miktarının ölçülmesi, elektronik mesafe ölçerlerin kullanılması, fotogrametrik yöntem, sondaj borusu içerisinde yüzey altında gerçekleşen hareketleri izlemeye yarayan inklinometrik yöntem ve yüzeydeki deformasyonların izlendiği ekstansometrelerdir (Kulaksız, 2012).

Bu metotlardan jeodezik yöntem ile izlemede, duraysız bölgede deformasyon oluşumu beklenen ve beklenmeyen karakteristik yerlerinde noktalar seçilerek bir kontrol ağı oluşturulur. Oluşturulan bu kontrol ağında belirlenen zaman aralıklarında periyodik ölçümler gerçekleştirilir. Neticede bu noktaların koordinatlarındaki değişim istatistik ve matematik test yöntemleri ile hesaplanarak kaydedilir. Son yıllarda da bu konuyla ilgili birçok araştırmacı araziden elde edilen verinin modellenmesi için birçok yeni çalışmalar yapmışlardır. Örneğin Venter ve diğ. (2013), Rio Tinto'da ki Pilbora demir madeninde, jeodezik izleme yöntemlerini kullanarak elde ettiği verileri ters-hız ve hız-zaman eğim yöntemlerinde kullanarak heyelanın gerçekleşeceği zaman tahmin etmiş ve tahminleri sonucu hiçbir personel ve makina zarara uğramadan kayma gerçekleşmiştir. Dereli (2010), Çetinkaya-Divriği (Sivas) demiryolunda bulunan şevlerin kinematik kontrollü duraysızlık analizlerini yapmıştır. Akbulut ve diğ. (2013), Afşin-Elbistan Linyitleri İşletmesi Kışlaköy açık ocağında batı ve doğu şevlerindeki duraysızlıkları incelemiş ve oluşabilecek kayma modelini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Karagöz ve diğ. (2016) Alipaşa açık ocak albit madeninde meydana gelen heyelanı GPS ile izlemiş ve oluşum nedenlerini araştırmıştır. Carlà ve diğ. (2017) üç farklı heyelanın (Mt. Beni, Vajont ve Stramboli) ve İtalya'daki tarihi şehir duvarının çökme davranışını incelemişlerdir. Ellerindeki veriler ile ters hız yöntemi uygulamışlardır. Vanneschi ve diğ. (2018), Çek Cumhuriyeti Kuzey Bohemya'da bulunan bir açık ocak linyit işletmesindeki şevlerde oluşan çatlakları jeodezik yöntemle izleyerek elde ettikleri verileri kullanarak limit denge duraylılık analizi ile sonlu elemanlar olasılık analizini karşılaştırmışlardır.

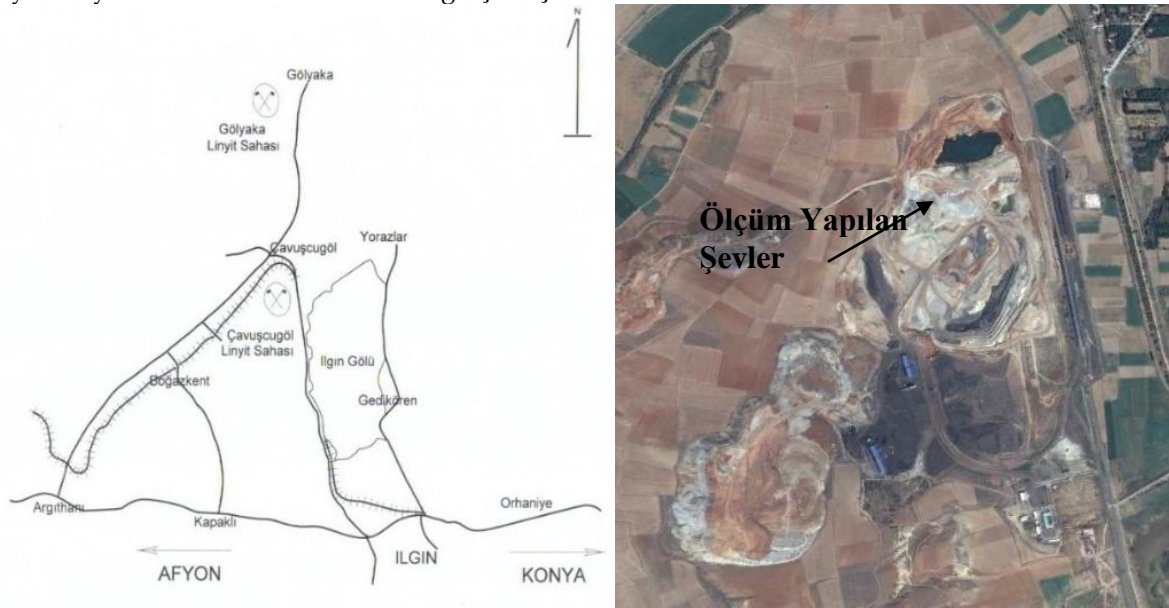
Bu çalışmada, TKİ-GLİ'ne bağlı Ilgın-Çavuşçugöl linyit sahası doğu şevlerindeki çekme çatlakları ile belirti veren olası duraysızlık alanlarındaki deformasyonlar jeodezik ölçüm yöntemi ile belirli zaman aralıklarında izlenmiştir. Çalışmada, heyelan oluşabilecek bölgedeki test noktalarının üç boyutlu koordinatlarının değişip değişmediğinin belirlenmesi ve kaymanın önceden tespiti için kontrol ağları kurulmuş ve belirli aralıklarla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, değişme miktarları kaydedilmiş ve elde edilen zamana bağlı deformasyon hareketlerinden matematiksel bir eşitlik geliştirilmiştir. Ardından da bu eşitlikten elde edilen veriler gerçek verilerle karşılaştırılarak arasında oluşan bağıntılar ve bu bağıntıların istatistiksel doğrulukları belirlenmiştir.

#### ÇALIŞMA SAHASI(FIELD STUDY)

Konya İli'ne bağlı Ilgın İlçesi; Konya-Afyon karayolu üzerinde, Konya'nın kuzeybatısında ve Konya'ya 87 km. mesafededir. Çavuşçugöl linyit açık ocağı, Ilgın İlçesi'nin kuzey batısında yer almaktadır. Ocak Ilgın İlçe merkezine 15 km. mesafededir. Ocak yolu asfalt olup yaz kış ulaşımına açıktır. Çavuşçugöl linyit ocağı aynı zamanda Konya-Afyon demiryolu güzergâhı üzerindedir. Sahanın yer bulduru haritası ve uydu görüntüsü Şekil 1'de görülmektedir.

Sahanın temelini paleozoik yaşlı metamorfik şistler oluşturur. Bunun üzerine jura-kretase yaşlı kristalize kireçtaşları, neojene ait pliosen çağında teşekkül etmiş kömürlü seri ve daha sonra kireçtaşı molozları, killi kumlu marnlı karışık seri ve nihayet moloz örtüleri ve alüvyonlar gelmektedir (Çağlar, 1989).

Ekskavatör-kamyon yöntemi sahada kömür üretimi ve dekapaj işlemleri için kullanılan yöntemdir. Bu sahada kömür üstü dekapajı, kömür üretimi, ara kesme ve kömür üstü temizliği gibi madencilik faaliyetleri yüklenici firmalar tarafından gerçekleştirilmektedir.



**Şekil 1.** TKİ-İLİ İlgin Çavuşçugöl ocağının yer bulduru haritası ve uydudan görüntüsü

**Figure 1.** Site location and satellite image of TKİ-GLİ İlgin Çavuşçugöl lignite mine

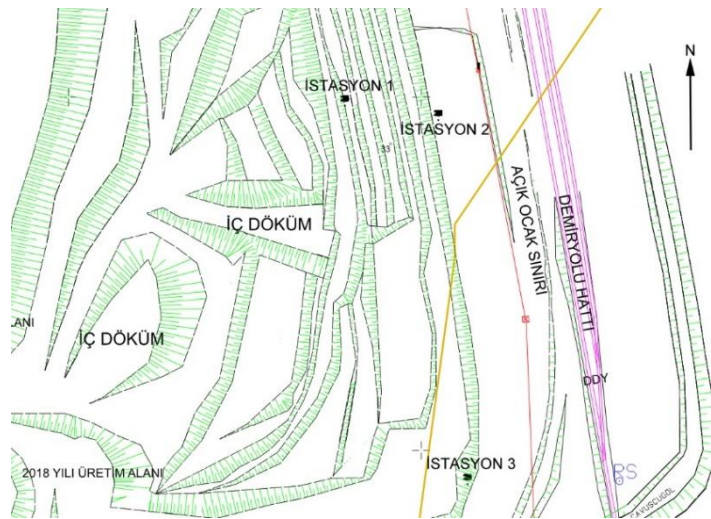
## ÖLÇÜM SİSTEMİ (MEASUREMENT SYSTEM)

Ölçüm sisteminin esasını jeodezik ağ oluşturmak yolu ile ocakta jeodezik ölçümler alınması oluşturmaktadır. Bir jeodezik ağ şevdeki hareketli bölgenin etrafında, üstünde ve hareketin olmadığı bölgelerde kontrol amaçlı oluşturulan prizmalardan meydana gelir. Şevdeki ölçüm istasyonundan prizmalara olan açılar ve mesafeler hareketin izlenmesi amacıyla düzenli olarak ölçülür. Sabit kontrol noktalarının stabil bir yüzey üzerinde olması çok önemlidir. Zemin hareketlerinin jeodezik ölçülerle saptanması için uygulanan yöntem, incelemeye konu olan bölgenin, hareket beklenen, hareket beklenmeyen ve hareketinden kuşku duyulan kesimlerinin jeodezik kontrol ağı oluşturmak ve bu ağı belli zaman tekrarlamaya ölçüsü sonucunda elde edilecek nokta koordinatlarının zamanla değişiminin matematik istatistik test yöntemleriyle analizi esasına dayanır. İstasyonların bulunduğu hareketli bölgede üç adet sabit poligon noktası tesis edilmiş ve hareketin olduğu bu üç noktada teodolit yardımı ile belirli zaman aralıklarıyla  $x$ ,  $y$  ve  $z$  koordinatları okunmuş ve kaydedilmiştir.

Sahada yapılan incelemelerde şev üstlerinde çekme çatlaklarının oluştuğu ve bazı lokal kaymaların olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2). Bu çalışmada, olası bir duraysızlık halinin tespiti ve gerekli önlemlerin alınabilmesi açısından bu bölgelerde oluşan zamana bağlı deformasyonların takip edilmesine ve bu izlemenin jeodezik yöntem ile yapılmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda, deformasyon oluşumu beklenen yerlerde 3 adet nokta belirlenerek bir kontrol ağı oluşturulmuş ve periyodik aralıklarla bu noktalardan ölçümler alınmıştır. Ölçümlere 5 Kasım 2018 tarihinde başlanarak 25 Şubat 2019 tarihinde sonlandırılmıştır. Toplamda 112 gün süren 23 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları neticesinde yaklaşık 100. günden sonra sahada deformasyon hızında artış görülmesi ile birlikte şevde yetkililer tarafından önlemler alınmış ve deformasyon hareketliliği durdurulmuştur. 112 günlük süreçte 1 no'lu istasyonda 235 mm, 2 no'lu istasyonda 346 mm ve 3 no'lu istasyonda da 182 mm toplam deformasyon (üç yönlü deformasyonun bileşkesi) tespit edilmiştir.

**Çizelge 1.** Jeodezik ölçüm tarihleri*Table 1. Geodetic measurement dates*

| Ölçüm No | Ölçüm Tarihi | Ölçüm No | Ölçüm Tarihi | Ölçüm No | Ölçüm Tarihi |
|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| 1        | 5.11.2018    | 9        | 15.12.2018   | 17       | 25.01.2019   |
| 2        | 10.11.2018   | 10       | 21.12.2018   | 18       | 31.01.2019   |
| 3        | 15.11.2018   | 11       | 25.12.2018   | 19       | 5.02.2019    |
| 4        | 20.11.2018   | 12       | 31.12.2018   | 20       | 9.02.2019    |
| 5        | 25.11.2018   | 13       | 5.01.2019    | 21       | 15.02.2019   |
| 6        | 30.11.2018   | 14       | 10.01.2019   | 22       | 20.02.2019   |
| 7        | 5.12.2018    | 15       | 16.01.2019   | 23       | 25.02.2019   |
| 8        | 10.12.2018   | 16       | 20.01.2019   |          |              |

**Şekil 2.** Sahada görülen çekme çatlakları*Figure 2. Tension cracks seen in the field***Şekil 3.** Jeodezik ölçüm istasyonlarının kurulduğu yerler*Figure 3. Points of geodetic measurement stations*

**MATEMATİKSEL EŞİTLİK (MATHEMATICAL EQUATION)**

Ocakta yapılan gözlemler ve ocak mühendislerinin yaptığı çalışmalar neticesinde şevlerde hareketlilik olduğu belirlenmiştir. Özellikle Çavuşçugöl tren istasyonu tarafında oluşabilecek bir duraysızlığın ciddi sonuçlar doğurabileceği düşüncesiyle bu hareketliliğin ne tür bir eğilim içerisinde olduğunun belirlenmesi önem kazanmıştır. Bu kapsamda, özellikle çekme çatlağının bulunduğu bölgeler dikkate alınarak ocak şevlerinde ölçüm noktalarının kurulması gereken koordinatlar tespit edilmiştir. Bu noktalara ölçüm istasyonları tesis edilmiş ve periyodik aralıklarla ölçümler yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerden bir veri tabanı oluşturulmuştur. Ardından, oluşturulan bu veri tabanı istatistiki olarak incelenmiş ve genel eğilimi belirlenmiştir. Hareket eğilimi belirlenen her bir istasyon için bir matematiksel eşitlik geliştirilmiştir. Elde edilen matematiksel eşitlik neticesinde elde edilen verilerden yola çıkarak ölçüm yapılmayan herhangi bir zamanda oluşabilecek deformasyon miktarı ve hızının belirlenmeye çalışılmıştır.

Kennedy ve diğ. (1970) tarafından yapılan bir çalışmada, Şili'deki bir bakır açık ocağında zamana bağlı deformasyonun üstel bir bağıntıya sahip olduğu belirlenmiştir. Benzer olarak, Zvelebil ve Moser, (2001) tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise aynı tipte bir bağıntının Çek Cumhuriyeti-Kuzey Bohemia'da uluslararası bir yol kenarında kumtaşı formasyonunda meydana gelen bir kaymada gerçekleştiği vurgulanmış ve zamana bağlı izleme sonucunda şev kayması yaklaşık 2 ay önceden tahmin edilebilmiştir. Ülkemizde de Ilgın ve Yatağan linyit açık ocaklarında bu alanda benzer çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Oluşan çekme çatlakları üzerinde deformasyon ölçümleri yapılarak zamana bağlı deformasyon oluşumu yüksek regresyonlu bağıntılar ile modellenmiş ve gerçek veriler ile eşitlikten elde edilen veriler karşılaştırılmıştır (Özşen ve Özkan, 2013, Özşen ve Kurt, 2015, Özşen, 2017). Bu çalışmada ise Özşen ve diğ.'nin (2019) geliştirmiş olduğu bağıntı uygulanmış ve geliştirilerek Eşitlik 1'deki değişiklik ile revize edilerek kullanılmıştır.

$$U = C_1 \log(t) + C_2 t + (C_3 t)^{C_4} \quad (1)$$

Burada,

**U:** Deformasyon miktarı (mm)

**t:** Zaman (gün)

**C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> ve C<sub>4</sub>:** Uygun istatistiksel parametrelerdir.

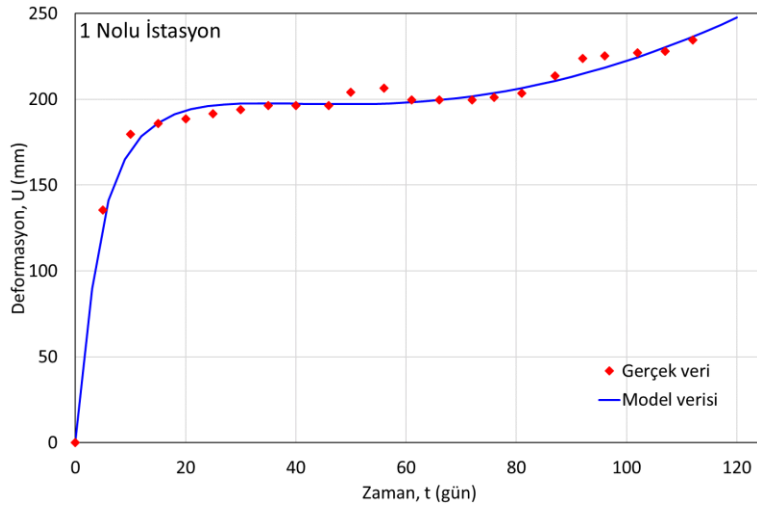
Yapılan istatistiksel analizler neticesinde elde edilen bağıntılar ve bu bağıntılar ile oluşturulan grafikler sırasıyla Çizelge 2 ve Şekil 4'de sunulmuştur.

**Çizelge 2.** Geliştirilen eşitlikler ve regresyon katsayıları

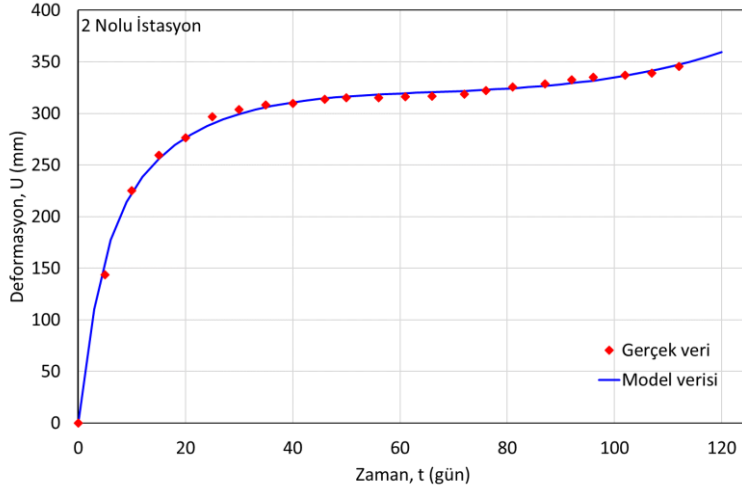
*Table 2. Equations developed and regression coefficients*

| İstasyon No | Eşitlik   | Regresyon Katsayısı |
|-------------|---|---------------------|
| 1           | $U = 106,3 \log(t) - 14,46t + (3,216t)^{1,225}$   | 0,95                |
| 2           | $U = 105,9 \log(t) - 2,053t + (0,03132t)^{3,469}$ | 0,99                |
| 3           | $U = 30,31 \log(t) - 0,1581t + (0,0366t)^{9,598}$ | 0,98                |

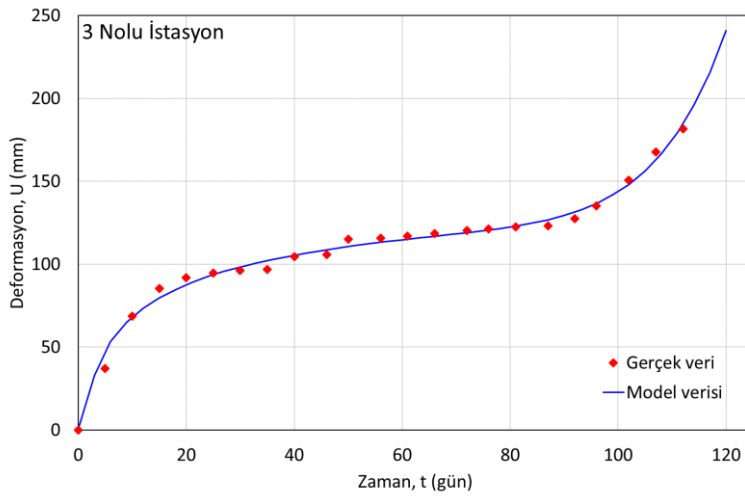
Matematiksel modelleme çalışmaları kapsamında Eşitlik 1'deki bağıntının yüksek regresyon katsayılarından da anlaşılacağı üzere gerçek arazi deformasyon verileri ile çok iyi uyum gösterdiği ortaya çıkmıştır. Çizelge 2'deki eşitlikler dikkate alınarak oluşturulan eğriler Şekil 4'de görüldüğü gibidir. Zamana bağlı deformasyon hareketlerinin incelenmesi neticesinde, İstasyon 1 için regresyon katsayısı 0,95, İstasyon 2 için 0,99 ve İstasyon 3 için 0,98 olarak belirlenmiştir.



(a) 1 no'lu istasyon



(b) 2 no'lu istasyon



(c) 3 no'lu istasyon

Şekil 4. Sahadan elde edilen gerçek deformasyon verileri ile matematiksel modelden edilen veriler

Figure 4. In-situ deformation data obtained from the field and the mathematical model data

**Çizelge 3.** Araziden elde edilen deformasyon miktarları ile eşitliklerden elde edilen deformasyon miktarlarının karşılaştırılması

*Table 3. Comparing the deformation data from in-situ field measurements and the equations*

| İstasyon No | Arazi verisi* (mm) | Eşitlik sonucu* (mm) |
|-------------|--------------------|----------------------|
| 1           | 235                | 239                  |
| 2           | 346                | 347                  |
| 3           | 182                | 185                  |

\*112 gün sonunda

Ayrıca elde edilen eşitlik gerçek ölçüm verileri ile denenmiş ve bu sonuçlar Çizelge 3’de sunulmuştur. Çizelge 2’de görülen fonksiyonlarda 112 gün olan nihai ölçüm zamanı yerine konulduğunda Eşitlik 2’den Çizelge 3’deki değerler elde edilmiştir. Bu değerlerden de görüleceği üzere eşitlikten gerçek veriye çok yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Bu değerlerin karşılaştırmalı grafikleri oluşturulduğunda aralarında doğrusal bir bağıntının olduğu belirlenmiştir (Şekil 5). Arazi deformasyon verileri ( $A_v$ ) ile eşitlik deformasyon verileri ( $E_v$ ) arasındaki bağıntılar Eşitlik 2’de verilmiştir. Eşitlik 1’den elde edilen sonuç verileri ile araziden elde edilen gerçek veriler karşılaştırıldığında iki parametre arasındaki regresyon katsayısı 0,99 olarak tespit edilmiştir. Bu durumda Eşitlik 1’den elde edilen değerlerin gerçek arazi verisine neredeyse tam olarak ulaştığı sonucuna varılmıştır.

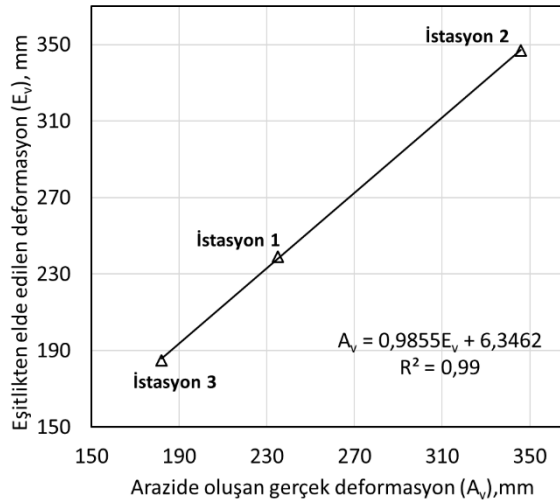
$$A_v = 0,9855E_v + 6,3462$$

(2)

Burada;

$A_v$ : Araziden elde edilen gerçek deformasyon verisi (mm),

$E_v$ : Eşitlik 1’den elde edilen veri (mm)



**Şekil 5.** Arazi deformasyon verileri ile eşitliklerden elde edilen deformasyon verilerinin karşılaştırılması

*Figure 5. Comparing the in-situ data and the data obtained from equations*

## SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Ilgın Çavuşçugöl linyit açık ocağı doğu şevlerinin çekme çatlakları ile belirti veren duraysız olduğu tespit edilen bölgesinde toplam 112 gün süren bir deformasyon izleme ve değerlendirme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Şev duraysızlığı olduğu belirlenen alanlarda jeodezik kontrol ağı oluşturularak deformasyon miktarları düzenli aralıklarla ölçülmüştür. Yatay ve düşey yönlerindeki deformasyonlar belirlenmiş, ardından tüm yönlerdeki deformasyonların bileşkesi alınarak

toplam deformasyon miktarı belirlenmiştir. Bu ölçümler ışığında 112 günlük ölçüm süreci neticesinde; 1 no'lu istasyonda 235 mm, 2 no'lu istasyonda 346 mm ve 3 no'lu istasyonda 182 mm toplam deformasyon tespit edilmiş ve tüm istasyonlarda hareketliliğin ocağın batı yönüne doğru olduğu görülmüştür.

Ocakta oluşan bu deformasyon hareketleri ileri tarihlerde oluşabilecek duraysızlık problemlerinin ne şekilde oluşabileceğinin sorgulanmasına neden olmuştur. Bu nedenle önceki çalışmaların da ışığında sonuç değerlerinin tespitinde yüksek regresyon katsayılı sonuçlar veren bir eşitlik geliştirilmiş ve verilere tatbik edilmiştir. Elde edilen matematiksel eşitliklerde amaç, gerçek verilerin kullanılarak bilinmeyen verilere ulaşılmasıdır. Bu sayede farklı tarihlerde bu ocakta oluşabilecek deformasyon miktarlarının tahmin edilmesi mümkün olabilecektir.

Ocak sürekli gözlem altında tutulmalı ve deformasyon hız ve ivmesi gibi bazı parametreler göz önüne alınarak kritik hız ve ivme değerlerine yaklaşıldığında bu değerler kritik sınırların üstüne çıkarsa mutlaka mevcut bölgede önlem alınmalıdır. Hızlanma eğilimin devam etmesi halinde hızlanmayı azaltacak tedbirler alınmalıdır. Yapılacak delme-patlatma çalışmaları, zaman içerisinde bölgede yapılan çalışmanın yoğunluğundaki değişimler, şiddetli yağış veya bölgede oluşabilecek depremler gibi bazı parametrelerin değişmesi de deformasyon hızında artışlara neden olabilir. Şevlerin sürekli izlenmesi ve elde edilen sonuçların acilen değerlendirilmesi istenmeyen durumların önüne geçilmesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada ele alınan bölgedeki hız ve ivme değerlerinin normal değerler içerisinde seyretmekte olduğu ancak son dönemde hızlanma eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Yapılan müdahaleler ile değerler tekrar kritik değerlerin altına çekilmiş ve olası tehlikeli bir durumun önüne geçilmiştir. Bu çalışmadaki denklemlerin kısa vadeli sonuçlar için kullanılması uygun olacaktır. Yukarıdaki etkenlerin değişimi ile farklı durumlar için denklemler revize edilmeli ve belirlenen yeni duruma göre hareket edilmelidir.

#### TEŞEKKÜR(ACKNOWLEDGEMENTS)

Yazarlar, bu çalışmanın yapılmasında her türlü yardımı gerçekleştiren TKİ-GLİ Ilgın-Çavuşçugöl İşletmesi ve Düzgün İş Mak. İnş. Mad. San. ve Tic. A.Ş. yönetici, mühendis ve çalışanlarına teşekkür ederler.

#### KAYNAKLAR(REFERENCES)

- Akbulut, İ., Çam, İ., Aksoy, T., Çağlan, D., Ölmez, T., 2013, "Açık ocaklarda şev duraysızlığı ve geriye dönük analizlere bir örnek: Afşin-Elbistan Kışlaköy açık kömür ocağı", Maden Tetkik ve Arama Dergisi, c.147, pp.115-126.
- Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., Nolesini, T., Gigli, G., Casagli, N., 2017, "Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses" Landslides, Vol.14, pp.517-534.
- Çağlar, A.T., 1989, "Haremi Köy-Ilgın (Konya) çevresinin jeolojisi ve linyit etütleri, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 42s., Konya
- Dereli, E., 2010, "Çetinkaya Divriği (Sivas) arasındaki tren yolu güzergahı boyunca şev duraylılıklarının araştırılması ve kinematik kontrollü olası duraysızlık modelinin üretilmesi", C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s., Sivas.
- Karagöz, S.D., Koca M.Y., 2016, "Alipaşa açık ocak albit madeninde meydana gelen heyelanın GPS kullanılarak izlenmesi ve oluşum nedenleri", Jeoloji Mühendisliği Dergisi, c.40, s.1, pp. 27-52.
- Kennedy, B.A., Niermeyer KE., Fahm BA., "Slope monitoring systems used in the prediction of a major slope failure at The Chuquicamata Mine, Chile", Planning Open Pit Mines Symposium, Johannesburg, pp.215-225, 1970.
- Kulaksız, S., 2012, "Şevlerde hareket izleme teknikleri", Madencilikte Çevre Yönetimi, Afyon, ss. 47-48.
- Özgenoğlu, A., 2005, "Açık işletmelerde şev stabilitesi analizi", Maden Mühendisliği Açık Ocak İşletmeciliği El Kitabı, Ankara, ss. 337-387.



- Özşen, H., Özkan, İ., 2013, "TKİ-GLİ İlgin linyit açık ocağı batı şevlerinde oluşan gerilim çatlaklarında oluşan deformasyonların izlenmesi ve zamana bağlı matematiksel modellenmesi", S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.1, s.3, ss. 37-44.
- Özşen, H., Kurt, A.C., 2015, "Soma linyit açık ocağında oluşan deformasyonların inklinometrik yöntemle izlenmesi", S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.3 s.3, ss. 59-65.
- Özşen, H., 2017, "Yatağan Eskişehir linyit açık ocağı batı şevlerinde oluşan deformasyonların jeodezik yöntemle izlenmesi ve matematiksel modellenmesi", S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Derg., c.5, s.3, ss. 329-340.
- Özşen, H., Özkan, İ., Mesutoğlu M., 2019, "An approach on modelling of in-situ deformations for unstable coal mine slopes", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 78, pp. 3191-3203.
- Vanneschi, C., Eyre, M., Burda, J., Žižka, L., Francioni, M., Coggana, J.S., 2018, "Investigation of landslide failure mechanisms adjacent to lignite mining operations in North Bohemia (Czech Republic) through a limit equilibrium/finite element modelling approach", Geomorphology, Vol. 320, pp. 142-153.
- Venter, J., Kuzmanovic, A., Wessels, S.D.N., 2013, "An Evaluation of the CUSUM and inverse velocity methods of failure prediction based on two open pit instabilities in the Pilbara", Slope Stability, pp. 1-16.
- Zvelebil, J., Moser, M., 2001, "Monitoring based time-prediction of rock falls: Three case-histories", Physics and Chemistry of the Earth (B), Vol.26, No.2, pp.159-167.



## MERRIFIELD REÇİNESİNE DESTEKLENMİŞ KALIKS[4]AREN DİNİTRO TÜREVİNİN SULU ORTAMDAKİ FENOLİK TÜRLERE KARŞI EKSTRAKSİYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Farabi TEMEL

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Konya,  
TÜRKİYE  
[ftemel@ktun.edu.tr](mailto:ftemel@ktun.edu.tr)

(Geliş/Received: 12.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.08.2019)

**ÖZ:** Bu çalışmada, Merrifield reçinesine desteklenmiş kaliks[4]aren dinitro türevi (DNK[4]MR) hazırlanarak, sulu ortamda bulunan önemli organik kirleticilerden olan fenol (FEN), *p*-klorofenol (PKF), *m*-nitrofenol (MNF) ve *p*-nitrofenol (PNF) gibi bazı fenolik türlere karşı ekstraksiyon özellikleri incelendi. Sentezlenen bileşiklerin, FT-IR analizleri ile karakterizasyonları gerçekleştirildi. Sonuçlara göre, yukarıda bahsi geçen fenolik türlere karşı sırasıyla % 24,3, 40,5, 62,4 ve 65,9 ekstraksiyon verileri elde edildi. Ayrıca, farklı fenolik tür konsantrasyonlarına karşı DNK[4]MR'nin ekstraksiyon özellikleri incelendi. Son olarak, DNK[4]MR'nin fenolik türlere karşı ekstraksiyon kabiliyetlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için farklı konsantrasyonlarda ligand çözeltileri hazırlanarak  $\log D$ 'ye karşı  $\log [L]$  grafiği çizilerek etkileşim sonucu oluşan ekstraksiyon denge sabitleri ( $K_{ex}$ ) hesaplandı. Hem literatür bilgileri hem de yapılan bu çalışmanın sonuçlarına göre, kaliksaren türevlerinin kendisine özgü üç boyutlu yapısı ve hidrojen bağı yapabilme kabiliyetleri sayesinde, fenolik türlerin sulu ortamlardan uzaklaştırılması konusunda oldukça kullanışlı olabileceklerini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ekstraksiyon, Hidrojen bağı, Fenolik türler, Kaliksaren, Merrifield reçinesi.

### Investigation of extraction properties of calix[4]arene dinitro derivative supported in merrifield resin towards phenolic species in aqueous media

**ABSTRACT:** This article describes the preparation of calix[4]arene dinitro derivative supported in Merrifield resin (DNC[4]MR) and the investigation of its extraction properties towards some phenolic species such as phenol (PHE), *p*-chlorophenol (PCP), *m*-nitrophenol (MNP) and *p*-nitrophenol (PNP) which are important organic contaminants in aqueous media. Synthesized compounds were characterized by FT-IR analysis. According to results, % extraction values of phenolic species above mentioned were found 24,3, 40,5, 62,4 ve 65,9 %, respectively. Additionally, the extraction properties of DNK[4]MR were investigated towards phenolic species towards different concentrations. Finally, the extraction properties of DNK[4]MR were also evaluated for different concentrations of the ligand. Extraction equilibrium constants were calculated by  $\log D$  vs.  $\log [L]$  graphs. Consequently, according to both literature and this study, calixarene derivatives which have a unique three-dimensional structure and hydrogen bonding capabilities can be useful for removal of phenolic species from aqueous media.

**Key Words:** Calixarene, Extraction, Hydrogen bonding, Merrifield resin, Phenolic species.

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin gelişmesiyle endüstriyel faaliyetlerin artışı çevre kirliliğini de beraberinde getirmiştir. Birçok endüstriyel faaliyetin sonucunda çevreye salınan kompleks yapılu kimyasallar, havaya, suya ve toprağa karışarak canlı sağlığını ciddi anlamda tehdit etmektedir (Nayak, 2007). Sanayi ve endüstri kuruluşlarının, hayvancılık ve konutların kullanımı sonucu oluşan sular, içerdikleri sağlığa zararlı, biyolojik ve kimyasal maddelerden dolayı "atık su" olarak tanımlanmaktadır. Petrokimya ve rafineri tesisleri, kömür fırınları, plastik, boya ve tekstil endüstrisi atık sularının arıtılması için bir çok çalışma yapılmaktadır. Bu endüstrilerin atık sularında, organik maddeler, özellikle fenol ve türevleri bol miktarda bulunmaktadır (Banat, 2000). Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı'na (USEPA) göre, fenolik türler en zararlı olarak sınıflandırılan 126 kirletici arasında 11. sırada yer almaktadır (Caturla, 1988). Bu nedenle, bu kirleticilerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması çevre ve insan sağlığı açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla, fenolik türlerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılması için ekstraksiyon, adsorpsiyon, kimyasal çöktürme, iyon değişimi ve membran prosesleri gibi birçok yöntem kullanılmaktadır (Al-Asheh, 2003). Bu metotlar arasında, ekstraksiyon tekniği gerek basitliği ve ucuzluğu gerekse organik kirleticilerin uzaklaştırılmasındaki performansı açısından son zamanlarda özellikle atık sulardan birçok kimyasal kirleticinin uzaklaştırılabilmesinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Cesari, 2017; Azzouz, 2018).

Makromoleküller, nötr yada yüklü moleküller için çeşitli reseptörlerin hazırlanması amacıyla host-guest kimyasında geniş bir kullanıma sahiptirler. Makromoleküller arasında kaliksaren türevleri kolay türevlendirilebilir kabiliyetleri ve kendisine has üç boyutlu yapıları ile birçok uygulamada kullanılmaktadır (Gutsche, 1998). Kaliksarenler, fenolik oksijenlerden oluşan polar alt bölgesinden (lower rim) iyonik türlerin taşınması yada bağlanması için yaygın bir şekilde türevlendirilmektedir. Ayrıca, küçük organik molekülleri ya da büyük bileşiklerin polar bölgelerini içinde tutabilecek aromatik halkaları ile birlikte vazo görünümüne sahiptir (Memon, 2003).

Kaliksaren bileşiklerinin polimerik ya da reçine yüzeyine immobilizasyonları, iyonların sorpsiyonu ya da bağlanması hususunda destek yüzey oluşturabilmesi için çok kullanışlı bir metot olarak görülmektedir (Tabakcı, 2008). Bu nedenle bu çalışmada da, merrifield reçinesine desteklenmiş kaliks[4]aren dinitro türevi (**DNK[4]MR**) hazırlanarak (Şekil 1) sulu ortamdan fenol (FEN), *p*-klorofenol (PKF), *m*-nitrofenol (MNF) ve *p*-nitrofenol (PNF) gibi farklı fenolik türlerin ekstraksiyon yöntemiyle giderimi hedeflenmiştir.

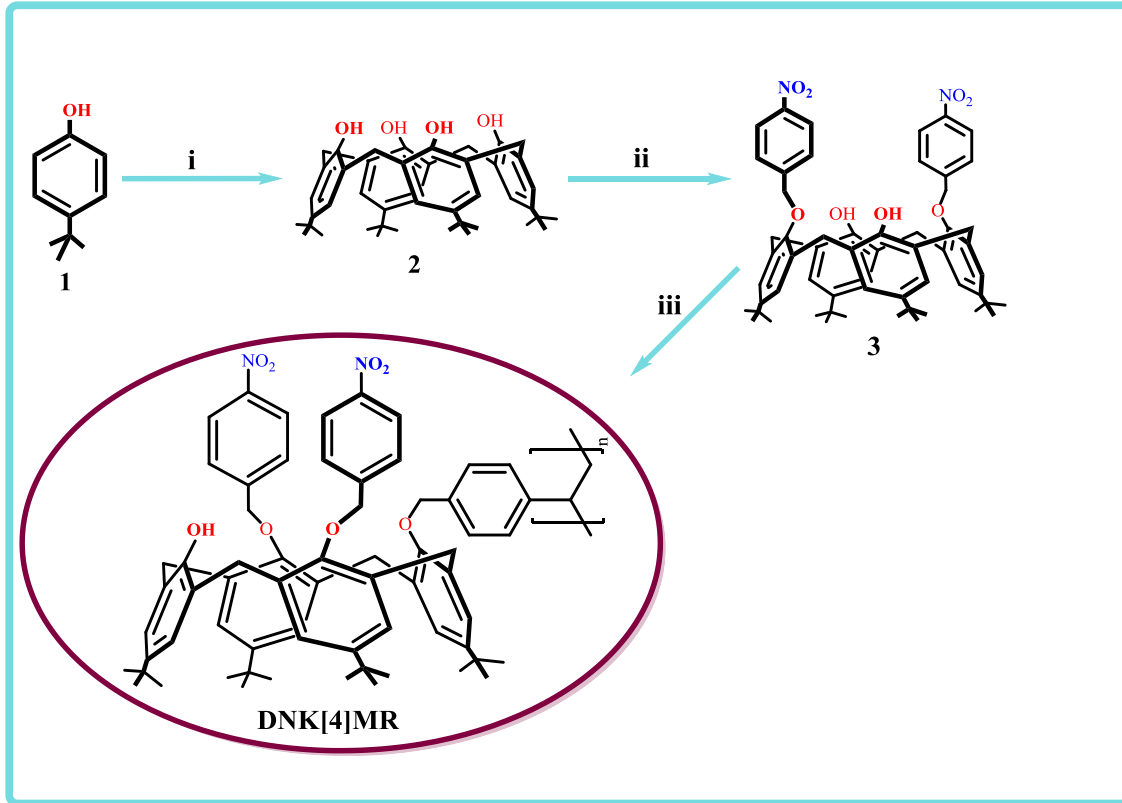
## MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### Kimyasallar ve Cihazlar (Chemicals and Instrumentations)

Sentezlenen moleküllerin erime noktası tayinleri, Krüss marka erime noktası tayin cihazı ile gerçekleştirildi. Perkin Elmer marka 100 FTIR spektrometresi ve Leco marka CHNS-932 Analizer elementel analiz cihazı kullanılarak elde edilen bileşikler karakterize edildi. İnce tabaka kromatografisi, silika jel (SiO<sub>2</sub>, Merck 60 F<sub>254</sub>) ile kaplanmış alüminyum plakalar kullanarak gerçekleştirildi. Çalışma sırasında kullanılan tüm malzemeler ve reaktifler analitik saflıkta olup, Merck ya da Sigma Aldrich firmasından alındı. Tüm sulu çözeltiler, Millipore Milli-Q Plus su arıtma cihazıyla saflaştırılan saf su ile hazırlandı.

### Kaliks[4]aren Türevlerinin Sentezi ve Merrifield Reçinesine Desteklenmesi (Synthesis of calix[4]arene derivatives and supporting in merrifield resin)

Kaliks[4]aren (Bileşik 2), *p*-ter-bütülfenol ile formaldehitin bazik ortamdaki kondenzasyon reaksiyonu ile (Gutsche, 1990), kaliks[4]aren dinitro türevi (Bileşik 3) ise Bileşik 2 ile *p*-nitrobenzil bromürün asetonitril ortamında  $K_2CO_3$  varlığında etkileştirilmesi ile literatürde belirtilen metotlar kullanılarak sentezlendi (Gutsche, 1990; Tabakci, 2004). Sentezlenen kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi ise, Bileşik 3 ile merrifield reçinesinin,  $K_2CO_3$  ve NaI varlığında, kuru aseton ortamında 2 gün boyunca kaynatılmasıyla literatürdeki bilinen yöntem uygulanarak gerçekleştirildi (Memon, 2006).



**Şekil 1.** Merrifield reçinesine desteklenmiş kaliks[4]aren dinitro türevinin (DNK[4]MR) sentez şeması (i) Formaldehit, NaOH, Difenileter; (ii) *p*-nitrobenzil bromür,  $K_2CO_3$ ,  $CH_3CN$ ; (iii) Merrifield reçinesi, NaI,  $K_2CO_3$ , Kuru aseton

*Figure 1.* Synthesis scheme of calix[4]arene dinitro derivative supported in merrifield resin (i) Formaldehyde, NaOH, Diphenyl ether; (ii) *p*-nitrobenzyl bromide,  $K_2CO_3$ ,  $CH_3CN$ ; (iii) Merrifield resin, NaI,  $K_2CO_3$ , dry acetone

### Kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi (DNK[4]MR) (Supporting of calix[4]arene dinitro derivative into merrifield resin)

Merrifield reçinesi (0,17g, 0,153 mmol), potasyum karbonat (0,75 g), sodyum iyodür (1 g, 10 mmol), ve 0,4 g 3 nolu bileşik (1,372 g, 1,53 mmol) kuru aseton (50 mL) içerisinde 48 saat boyunca geri soğutucu altında kaynatılır. Süresi tamamlandıktan sonra karışım süzülür ve üzerinden aseton ile yıkanır, ardından çözücü vakum altında kuruluğa kadar uzaklaştırılır. Diklorometan içerisinde çözülen katı madde, HCl ile ekstrakte edilip, asitliği giderilir. Organik faz ayrılır, kurutulur ve çözücüsü uzaklaştırılır (Memon, 2006). IR:  $3421\text{ cm}^{-1}$  (N-H),  $1521\text{ cm}^{-1}$  (N-O),  $1012\text{ cm}^{-1}$  (C-O).

### Sıvı-sıvı ekstraksiyon çalışmaları (Liquid-liquid extraction studies)

Fenol türevlerinin sıvı-sıvı ekstraksiyon çalışmaları Pedersen prosedürüne göre gerçekleştirildi (Pedersen, 1968). Sıvı-sıvı ekstraksiyon çalışmaları için, fenol türevlerinin saf su içerisinde  $5 \times 10^{-5}$  M olacak şekilde çözeltileri hazırlandı. Ayrıca, DNK[4]MR reçinesinin ise, kloroform içerisinde  $1 \times 10^{-3}$  M olacak şekilde çözeltisi hazırlandı. Hazırlanan fenol türevlerinin çözeltilerinden 10 mL alınarak farklı erlenler içerisine eklendi. Ayrıca DNK[4]MR çözeltisinden 10'er mL alınarak içerisinde fenol çözeltileri bulunan erlenler içerisine ekleme yapılarak karışımların  $25^{\circ}\text{C}$ 'da 1 saat boyunca karışmaları sağlandı. Karışım öncesi ve sonrası, sulu ortamda bulunan fenol çözeltilerinin konsantrasyonları literatürde belirtilen yöntemlerle spektrofotometrik olarak belirlendi (Zhu, 2000; Rawajfih, 2006). Yüzde ekstraksiyon değerleri Eşitlik 1'e göre hesaplandı.

$$\text{Ekstraksiyon Yüzdesi (E\%)} = \left[ \frac{C_0 - C}{C_0} \right] \times 100 \quad (1)$$

$C_0$  ve  $C$ , sırasıyla çözelti ortamında bulunan fenol türevlerinin ekstraksiyon öncesi ve sonrası konsantrasyonlarını (M) ifade etmektedir (Tabakci, 2012).

Ekstraksiyon çalışmalarının sonuçlarının daha iyi anlaşılması ve hazırlanan bileşiğin (L=ligand) ekstraksiyon kabiliyetinin ölçülebilmesi için fenolik türlerin (A) iki faz arasında dağılma sabiti D'nin hesaplanması gerekir. Genel ekstraksiyon denge denklemi Eşitlik 2'de verildi.

$$n(L)_{org} + n(A)_{aq} \in \left( (L)_n, (A)_n \right)_{org} \quad (2)$$

Ekstraksiyon denge sabiti  $K_{ex}$ , Eşitlik 3'de gösterildi.

$$K_{ex} = \frac{\left[ (L)_n, (A)_n \right]_{org}}{\left[ A \right]_{aq}^n \left[ L \right]_{org}^n} \quad (3)$$

Dağılma sabiti D, ekstraksiyon sonrası fenolik türün her iki fazdaki konsantrasyon oranını ifade etmektedir (Eşitlik 4).

$$D = \frac{\left[ A \right]_{org}}{\left[ A \right]_{aq}} \quad (4)$$

Eşitlik 4'ü, Eşitlik 3 içerisine yerleştirilerek her iki tarafın logaritması alındığında Eşitlik 5 elde edilir.

$$\log D = \log K_{ex} + n \log \left[ L \right]_{aq} \quad (5)$$

Burada  $[L]$ , hazırlanan ligandın organik fazdaki konsantrasyonunu ifade etmektedir. Sonuç olarak, bu yaklaşımla  $\log D$ 'ye karşı  $\log [L]$  grafiği farklı konsantrasyonlarda ekstrakte edilen fenol türlerinin stokiometrisinin hesaplanması için lineer olmalıdır (Yilmaz, 2009).

### Kesikli sistem adsorpsiyon çalışmaları (Batchwise adsorption studies)

Merrifield reçinesinin sıvı-sıvı ekstraksiyon çalışmasında kullanılamaması (çözünmemesinden dolayı) ve kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmiş halinin fenolik türlerle karşı davranışlarını merrifield reçinesi ile kıyaslayabilmek için adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirildi. Bu amaçla, 25 mg merrifield reçinesi 10 ml fenol türevi ( $5 \times 10^{-5}$  M) ile erlen içerisinde  $25^{\circ}\text{C}$ 'da 1 saat boyunca karıştırıldı. Adsorpsiyon deneylerinden sonra, örnekler santrifüjlenerek sulu ortamda kalan fenol çözeltilerinin konsantrasyonları belirlendi. Yüzde adsorpsiyon değerleri Eşitlik 6'ya göre hesaplandı.

$$\text{Adsorpsiyon Yüzdesi (A\%)} = \left[ \frac{(C_o - C)}{C} \right] \times 100 \quad (6)$$

$C_o$  ve  $C$ , sırasıyla çözelti ortamında bulunan fenol türevlerinin adsorpsiyon öncesi ve sonrası konsantrasyonlarını (M) ifade etmektedir (Temel, 2020).

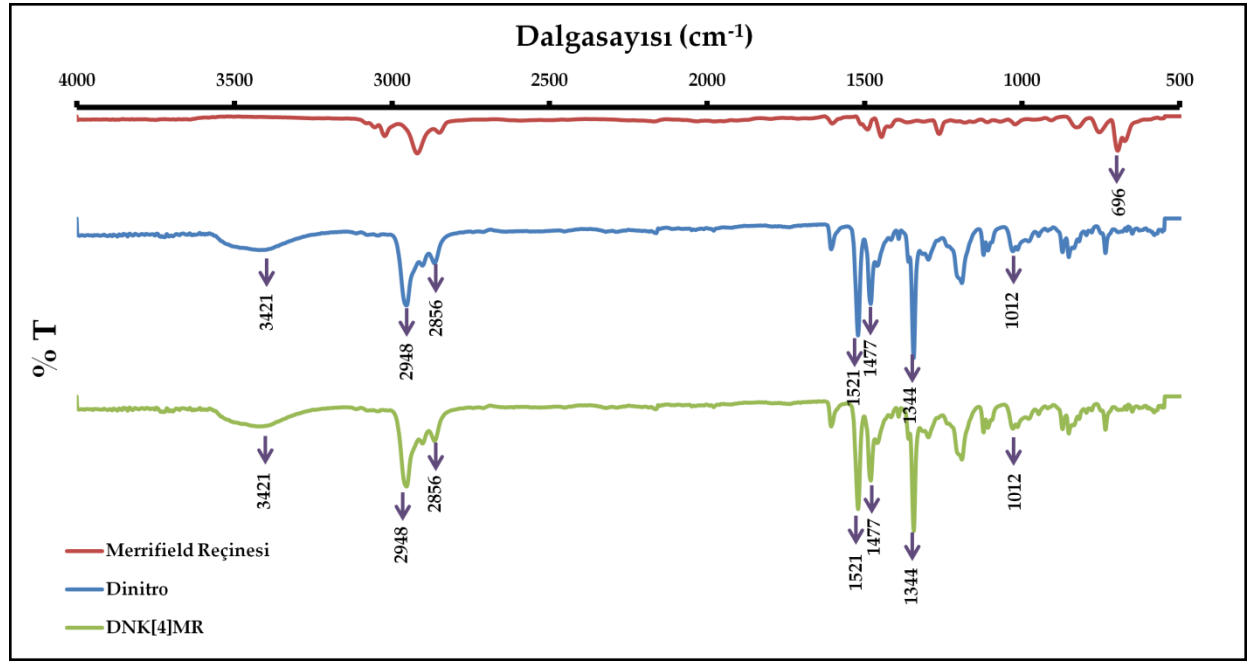
## BULGULAR (RESULTS)

### Sentez ve Karakterizasyon (Synthesis and Characterization)

Kaliksarenler, kendine has üç boyutlu yapıları sayesinde nötral moleküller, katyon ve anyonlar, biyolojik moleküller, uçucu organik bileşiklerin (UOB) tanınması yada algılanması için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Erdemir, 2016; Temel, 2016; Akpınar, 2019; Ozcelik, 2019a; Ozcelik, 2019b; Temel, 2019a; Temel, 2019b; Temel, 2020a; 2020b). Bu çalışmada, sulu ortamdan fenolik türleri uzaklaştırmak için, merrifield reçinesine desteklenmiş kaliksaren dinitro türevi hazırlandı (Şekil 1). Bileşik 2, 3 ve kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi literatürdeki bilinen yöntem uygulanarak gerçekleştirildi (Gutsche, 1990; Tabakci, 2004; Memon, 2006). Kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi ile elde edilen **DNK[4]MR**'nin karakterizasyonu FT-IR spektroskopisi ile gerçekleştirildi. Şekil 2'de verilen FT-IR spektrumlarından **DNK[4]MR**'nin varlığı merrifield yapısına ait olan  $696 \text{ cm}^{-1}$ 'deki C-Cl bağına ait bandın kaybolmasından anlaşıldı. Ayrıca, C-O bağına ait gerilmenin  $1012 \text{ cm}^{-1}$ , tersiyer bütül gruplarında bulunan C-H bağına ait gerilmenin  $1344 \text{ cm}^{-1}$ , karakteristik benzen halkalarına ait gerilmenin  $1477 \text{ cm}^{-1}$ , N-O bağına ait gerilmenin  $1521 \text{ cm}^{-1}$ , C-H bağına ait gerilmenin  $2856\text{-}2948 \text{ cm}^{-1}$  ve N-H bağına ait gerilmenin  $3421 \text{ cm}^{-1}$ 'de görülmesi, kaliks[4]aren dinitro yapısının merrifield reçinesine desteklenmesi ile kaliks[4]aren dinitro türevinin yapısında bir bozulma gerçekleşmeden **DNK[4]MR**'nin elde edildiğini ispatladı.

### Ekstraksiyon Çalışmaları (Extraction Studies)

Sentezlenen ligandların fenolik türlere karşı ekstrakte özelliklerini incelemek amacıyla sıvı-sıvı ekstraksiyon çalışmaları gerçekleştirildi. Bu amaçla fenol türlerinin (FEN, PKF, MNF, PNF) sulu çözeltileri ( $5 \times 10^{-5} \text{ M}$ ) ile ligandların kloroform içerisinde çözeltileri ( $1 \times 10^{-3} \text{ M}$ ) 10'ar mL alınarak  $25^\circ\text{C}$ 'da 1 saat etkileştirildi (Pedersen, 1968). Ekstraksiyon sonunda sulu fazda bulunan fenol türevinin denge konsantrasyonu, spektrofotometrik yöntemle (Abay, 2005) tayin edildi ve % Ekstraksiyon sonuçları ise Çizelge 1'de verildi. Ayrıca, en iyi ekstraksiyon sonuçlarının gözlemlendiği **DNK[4]MR**'a ait spektrofotometrik sonuçlar ise Şekil 3'de verildi. Çizelge 1'de verilen sonuçlara göre, 3 no'lu kaliks[4]aren dinitro türevinin MNF ve PNF hariç diğer fenolik türleri sulu ortamdan organik faza aktarması eser miktarlarda gerçekleştiği belirlendi. Ayrıca, merrifield reçinesinin kullanıldığı adsorpsiyon sonuçlarına göre ise tüm fenolik türlere karşı adsorpsiyonun istenen verimde gerçekleşmediği ve reçinenin kendi başına kullanımının fenolik türlerin adsorpsiyonu konusunda kullanışsız olduğu görüldü. Kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi sonucu elde edilen **DNK[4]MR** reçinesinin ise monomerik yapıdaki kaliks[4]aren türevine ve merrifield reçinesine göre çok iyi sonuçlar verdiği görüldü. Bunun nedeni, kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesine desteklenmesi ile daha sağlam bir yapı oluşmuş ve böylece fenolik türlerin sulu ortamdan organik faza transferleri daha iyi gerçekleşmiş oldu (Memon, 2006). **DNK[4]MR** reçinesinin fenolik türlere karşı ekstraksiyon performanslarının literatür ile karşılaştırılabilmesi için Çizelge 2'de farklı literatürlere ait % Ekstraksiyon verileri verildi. Bu sonuçlara göre, **DNK[4]MR** reçinesinin literatürde kullanılan bileşikler ile kıyaslanabilir bir performans gösterdiği belirlendi.



Şekil 2. Merrifield reçinesi, sentezlenen kaliks[4]aren dinitro türevi ve DNK[4]MR için FTIR spektrumları

Figure 2. FTIR spectra for merrifield resin, calix[4]arene dinitro derivative and DNK[4]MR

Çizelge 1. Fenolik türlerin sıvı-sıvı ekstraksiyon sonuçları

Table 1. Liquid-liquid extraction results of phenolic species

| Ligand                           | FEN (270 nm) | PKF (280 nm) | MNF (274 nm) | PNF (317 nm) |
|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| K[4]A <sup>a</sup>               | <1,0         | <1,0         | 27,5         | 62,0         |
| DNK[4]MR <sup>a</sup>            | 24,3         | 40,5         | 62,4         | 65,9         |
| Merrifield Reçinesi <sup>b</sup> | 5,7          | 5,7          | 6,7          | 8,5          |

<sup>a</sup>Sıvı-sıvı ekstraksiyon; Sulu faz, [fenolik türler]=  $5 \times 10^{-5}$  M; organik faz, kloroform, [ligand]=  $1 \times 10^{-3}$  M, 25°C, 1 saat.

<sup>b</sup>Kesikli sistem adsorpsiyon; Sulu faz, [fenolik türler]=  $5 \times 10^{-5}$  M; katı faz [ligand]= 25 mg, 25°C, 1 saat.

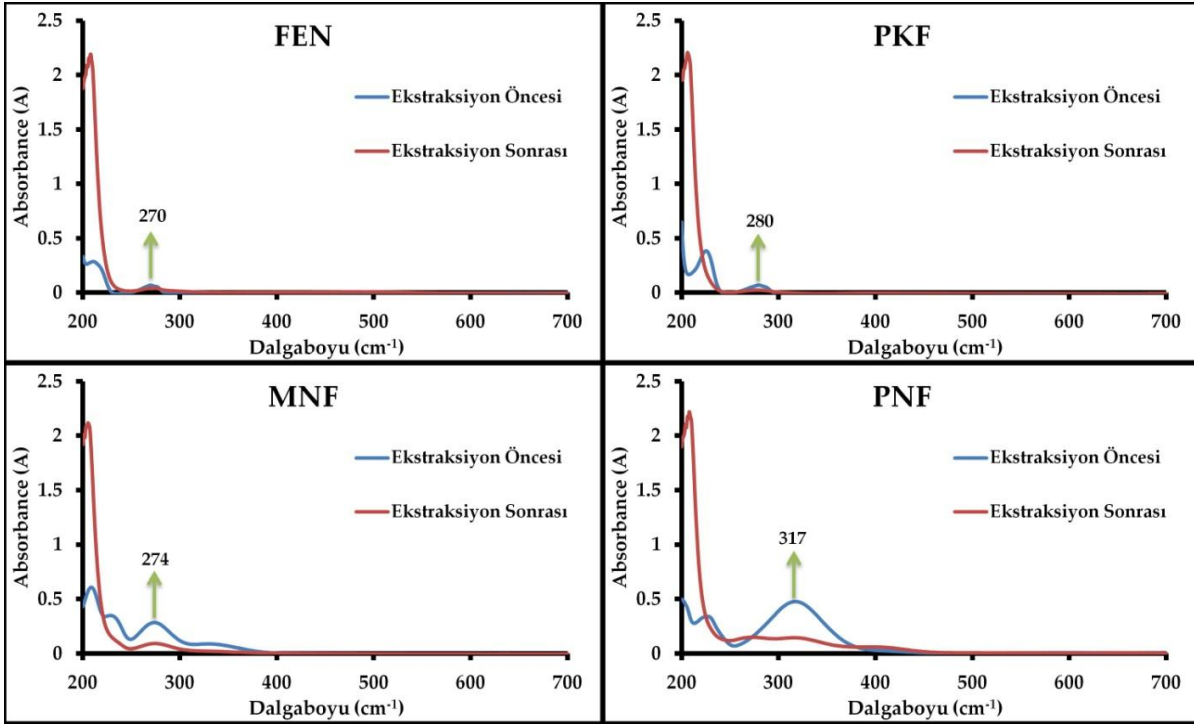
Çizelge 2. Fenolik türlerin sulu ortamdan % giderimlerine ait literatür sonuçları

Table 2. Literature results regarding removal of phenolic species in aqueous media

| Yöntem                    | Bileşik                | FEN  | PKF  | MNF  | PNF  | Ref.             |
|---------------------------|------------------------|------|------|------|------|------------------|
| Sıvı-sıvı ekstraksiyon    | Emülsiyon Sıvı Membran | -    | -    | -    | 36,9 | (Chaouchi, 2014) |
| Bulut nokta ekstraksiyonu | Triton X-114           | 47,3 | -    | 43,8 | -    | (Wei, 2008)      |
| Sıvı-sıvı ekstraksiyon    | Ionic Liquids          | 58,9 | 68,1 | -    | -    | (Brinda, 2013)   |
| Sıvı-katı ekstraksiyon    | Porapak RDX            | 14   | 25   | -    | 25   | (Castillo, 1997) |
| Kesikli adsorpsiyon       | C[4]BS                 | 2,1  | 2,4  | 2,8  | 23,5 | (Dolaksiz, 2018) |
| Kesikli adsorpsiyon       | C[4]APS                | -    | -    | -    | 76,0 | (Aladağlı, 2015) |
| Sıvı-sıvı ekstraksiyon    | DNK[4]MR               | 24,3 | 40,5 | 62,4 | 65,9 | Bu çalışmada     |

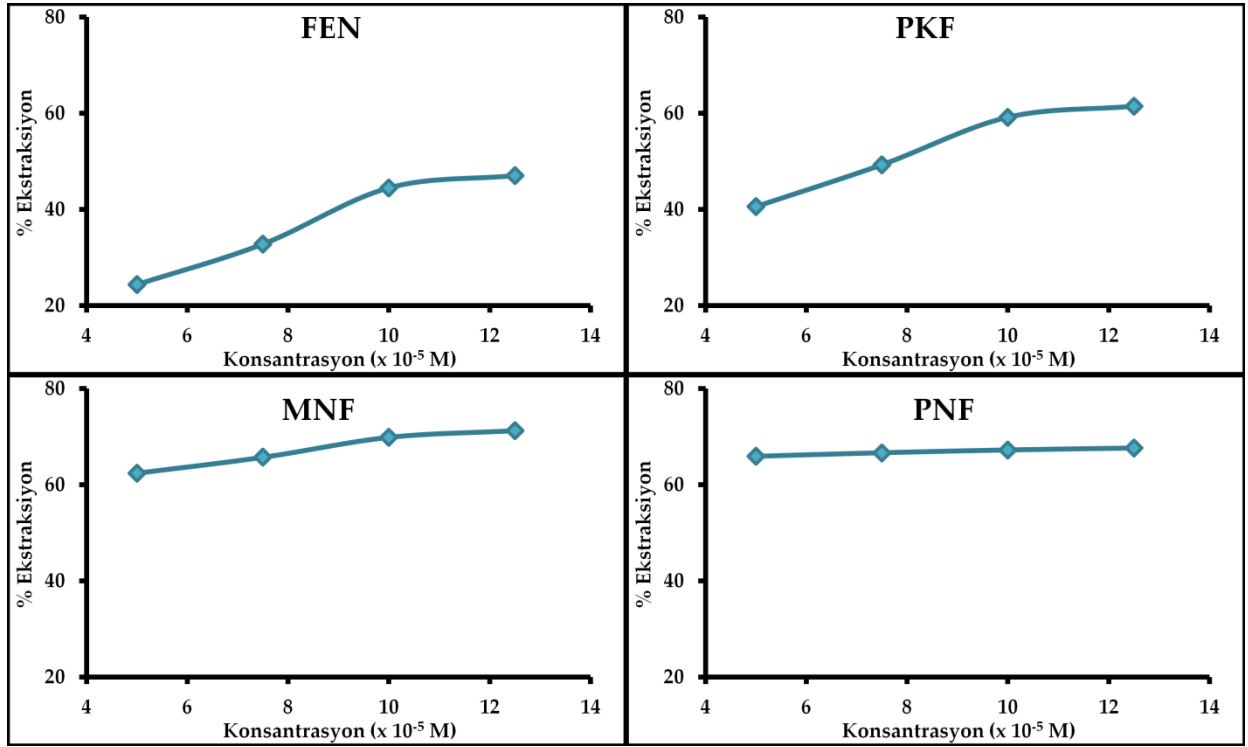
### Farklı Konsantrasyon Çalışmaları (Different Concentration Assay)

Yapılan ilk çalışmalar ışığında fenolik türlere karşı en iyi ekstraksiyon özelliklerini gösteren DNK[4]MR reçinesinin farklı konsantrasyonlardaki fenolik türlere karşı ekstraksiyon özelliklerinin incelenmesi için farklı konsantrasyonlarda ( $5 \times 10^{-5} \text{M}$ ,  $7,5 \times 10^{-5} \text{M}$ ,  $10 \times 10^{-5} \text{M}$ ,  $12,5 \times 10^{-5} \text{M}$ ,) fenol türevleri hazırlandı. Böylece, ekstraksiyon çalışmaları farklı konsantrasyonlardaki fenol türevlerine karşı daha önce de bahsedildiği gibi  $1 \times 10^{-3} \text{M}$  ligand kullanılarak,  $25^\circ \text{C}$ 'de 1 saat süreyle gerçekleştirildi. Deney sonrası elde edilen veriler kullanılarak, farklı fenolik tür konsantrasyonuna karşı % ekstraksiyon sonuçları Şekil 4'de verildi. Şekil 4'de, % Ekstraksiyon değerlerinin fenol türevlerinin konsantrasyonundaki artışa bağlı olarak beklenen şekilde arttığı gözlemlendi. Bu durumun, DNK[4]MR reçinesinin düşük analit konsantrasyonlarında doygunluğa ulaşmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Burada, fenolik türlerin başlangıç konsantrasyonlarının fenolik tür moleküllerinin her iki sıvı faz arasındaki geçişlerine engel olacak kütle transfer direncinin üstesinde gelmek için itici güç olarak önemli bir rol oynadığı anlaşıldı. Sonuç olarak, çözelti içinde bulunan bütün fenolik tür moleküllerinin DNK[4]MR reçinesinin bağlanma kısımları ile etkileşimlerinin fenolik türlerin başlangıç konsantrasyonlarının artışıyla giderek arttığı sonucuna varıldı.



Şekil 3. DNK[4]MR'nin fenolik türlere karşı ekstraksiyon öncesi ve sonrası absorbanans spektrumları  
Figure 3. Absorbance spectra of DNK[4]MR before and after extraction against phenolic species



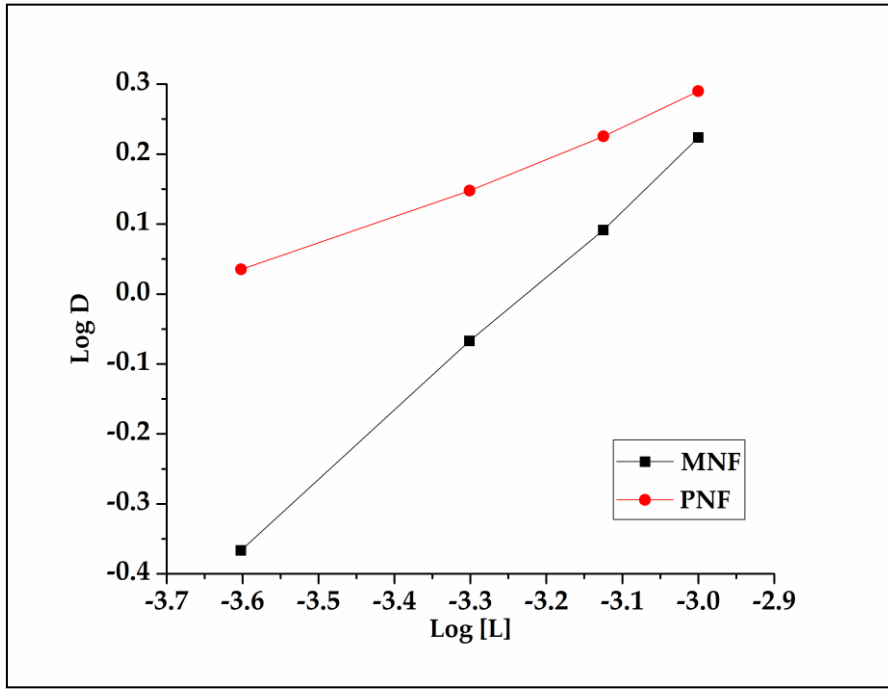


Şekil 4. DNK[4]MR'nin farklı konsantrasyonlardaki fenolik türlere karşı % ekstraksiyon değerleri

Figure 4. % extraction data of DNK[4]MR against phenolic species in different concentrations

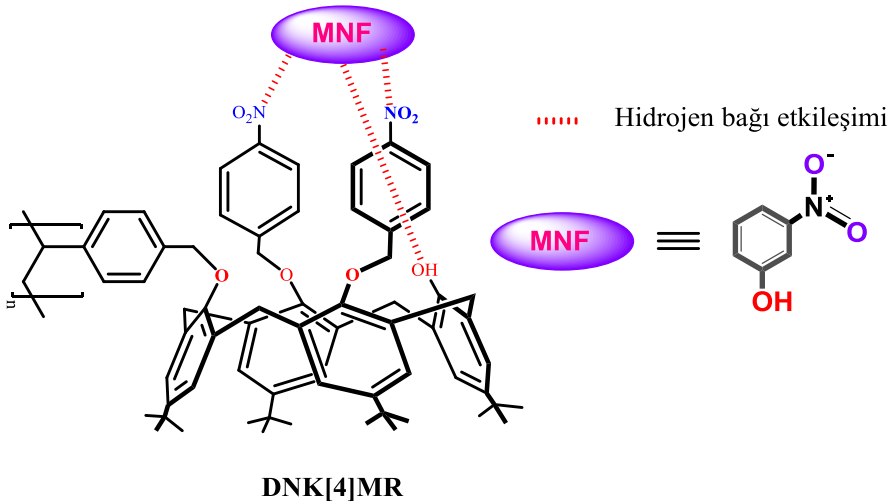
Bu fenolik türlerin ekstraksiyon olayını anlamak için yapılan çalışmalar sonucunda, hem kaliksaren dinitro yapısının hem de MNF ve PNF türlerinin hidrojen bağı yapabilme kabiliyetleri bu çalışmada analit/ligand arasında kompleks oluşumu açısından hidrojen bağının ön plana çıktığını gösterdi (Li, 2009; He, 2018). Bu yaklaşım, fenolik türlerin hidrojen bağ yapma kabiliyetlerinin asitlik dereceleri ile doğru orantılı olması ve asitlik derecelerinin (pKa değerleri FEN, PKF, MNF ve PNF için sırasıyla; 10,0, 9,2, 8,3 ve 7,2) de ekstraksiyon kabiliyetleri ile doğru orantılı olarak değişmesiyle desteklendi. Şöyle ki, daha güçlü bir hidrojen bağı etkileşiminin gözlemlendiği MNF ve PNF'den ligand yüzeyindeki oksijen atomlarına proton transferi diğer fenolik türlere göre daha kolay gerçekleşmektedir (Dolaksız, 2018).

Ayrıca, DNK[4]MR reçinesinin fenolik türlere karşı bu kabiliyetlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi için kloroform içerisinde farklı konsantrasyonlarda çözeltileri hazırlanarak ekstraksiyon çalışmaları için kullanıldı. Bu kısımda daha önceki veriler ışığında ekstraksiyon verimi yüksek olması nedeniyle MNF ve PNF çözeltileri kullanıldı. Deney sonrası elde edilen veriler kullanılarak,  $\log D$ 'ye karşı  $\log [L]$  grafiği çizilerek Şekil 5'de verildi. Her iki fenol türevi için yapılan çalışmaların sonuçlarına göre,  $\log D$ 'ye karşı  $\log [L]$  arasında lineer bir ilişkinin olduğu ve bu denklemlerin eğimlerinin ise MNF ve PNF için sırasıyla 0,97 ve 0,42 olduğu belirlendi ( $y_{MNF}=0.97x+3.14$ ;  $y_{PNF}=0.42x+1.54$ ). Bu durumda, DNK[4]MR reçinesi ile MNF ve PNF çözeltileri arasında sırasıyla 1:1 ve 1:2 şeklinde komplekslerin oluştuğu anlaşıldı (Şekil 6). Bununla birlikte,  $\log D$ 'ye karşı  $\log [L]$  grafiğinden elde edilen veriler ışığında, ekstraksiyon denge sabitleri ( $K_{ex}$ ) MNF ve PNF için sırasıyla 1377 ve 35 olarak hesaplandı.



Şekil 5. DNK[4]MR'nin farklı konsantrasyonlarındaki çözeltilerinin MNF ve PNF ekstraksiyon sonuçlarına ait  $\text{Log } D$ 'ye karşı  $\text{Log } [L]$  grafiği

Figure 5.  $\text{Log } D$  vs.  $\text{Log } [L]$  for the extraction data of MNP and PNP by DNK[4]MR solutions in different concentrations



Şekil 6. DNK[4]MR ile MNF arasında gerçekleşen muhtemel hidrojen bağı etkileşimi

Figure 6. Possible hydrogen bonding interaction between DNK[4]MR and MNF

## SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, merrifield reçinesine desteklenmiş kaliks[4]aren dinitro türevinin (DNK[4]MR) atık ve içme sularında bulunan fenol, *p*-klorofenol, *m*-nitrofenol ve *p*-nitrofenol gibi farklı fenolik türlere karşı sulu çözeltilerdeki ekstraksiyon özellikleri incelendi. Sentezlenen polimerik reçinenin karakterizasyonu FT-IR analizleri ile gerçekleştirildi. Ekstraksiyon deneyleri, kaliks[4]aren dinitro türevinin merrifield reçinesi ile etkileştirilmesi sonucu elde edilen DNK[4]MR'nin hem merrifield reçinesine göre hem de kaliks[4]aren dinitro türevine göre fenol türevlerine karşı oldukça iyi ekstraksiyon özellikleri gösterdiğini ortaya koydu. Farklı analit konsantrasyon çalışmaları da gerçekleştirilerek, konsantrasyon artışının % Ekstraksiyon verimini artırdığı belirlendi. Sonuç olarak

kaliks[4]aren türevlerinin merrifield reçinesine desteklenmesinin sulu ortamdan fenolik türlerin ekstraksiyonunda oldukça verimli ve kullanışlı bir yaklaşım olacağı görüldü.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abay, İ., Denizli, A., Bişkin, E. ve Salih, B., 2005, Removal and pre-concentration of phenolic species onto  $\beta$ -cyclodextrin modified poly(hydroxyethylmethacrylate-ethyleneglycoldimethacrylate) microbeads, *Chemosphere*, 61 (9), 1263-1272.
- Akpinar, M., Temel, F., Tabakci, B., Ozcelik, E. ve Tabakci, M., 2019, A phenyl glycinol appended calix[4]arene film for chiral detection of ascorbic acid on gold surface, *Analytical Biochemistry*, 583, 113373.
- Al-Asheh, S., Banat, F. ve Abu-Aitah, L., 2003, Adsorption of phenol using different types of activated bentonites, *Separation and Purification Technology*, 33 (1), 1-10.
- Aladağlı, V., Temel, F. ve Tabakcı, M., 2015, Removal of p-nitrophenol from aqueous solutions using aminopropyl silica gel-immobilized calix[4]arene polymer (C[4]APS), *Anadolu University Journal of Science and Technology-A Applied Sciences and Engineering*, 16 (2), 155.
- Azzouz, A., Kailasa, S. K., Lee, S. S., J. Rascón, A., Ballesteros, E., Zhang, M. ve Kim, K.-H., 2018, Review of nanomaterials as sorbents in solid-phase extraction for environmental samples, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 108, 347-369.
- Banat, F. A., Al-Bashir, B., Al-Asheh, S. ve Hayajneh, O., 2000, Adsorption of phenol by bentonite, *Environmental Pollution*, 107 (3), 391-398.
- Brinda L., A., Balasubramanian, A. ve Venkatesan, S., 2013, Extraction of phenol and chlorophenols using ionic liquid [Bmim]+[BF4]- dissolved in tributyl phosphate, *CLEAN – Soil, Air, Water*, 41 (4), 349-355.
- Castillo, M., Puig, D. ve Barcelo', D., 1997, Determination of priority phenolic compounds in water and industrial effluents by polymeric liquid-solid extraction cartridges using automated sample preparation with extraction columns and liquid chromatography use of liquid-solid extraction cartridges for stabilization of phenols, *Journal of Chromatography A*, 778 (1), 301-311.
- Caturla, F., Martín-Martínez, J. M., Molina-Sabio, M., Rodríguez-Reinoso, F. ve Torregrosa, R., 1988, Adsorption of substituted phenols on activated carbon, *Journal of Colloid and Interface Science*, 124 (2), 528-534.
- Cesari, L., Canabady-Rochelle, L. ve Mutelet, F., 2017, Extraction of phenolic compounds from aqueous solution using choline bis(trifluoromethylsulfonyl)imide, *Fluid Phase Equilibria*, 446, 28-35.
- Chaouchi, S. ve Hamdaoui, O., 2014, Extraction of priority pollutant 4-nitrophenol from water by emulsion liquid membrane: emulsion stability, effect of operational conditions and membrane reuse, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35 (9), 1278-1288.
- Dolaksiz, Y. E., Temel, F. ve Tabakci, M., 2018, Adsorption of phenolic compounds onto calix[4]arene-bonded silica gels from aqueous solutions, *Reactive and Functional Polymers*, 126, 27-35.
- Erdemir, S., Tabakci, B. ve Tabakci, M., 2016, A highly selective fluorescent sensor based on calix[4]arene appended benzothiazole units for Cu<sup>2+</sup>, S<sup>2-</sup> and HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> ions in aqueous solution, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 228, 109-116.
- Gutsche, C. D. ve Iqbal, M., 1990, *p-tert-Butylcalix[4]arene*, *Organic Syntheses*, 68, 234.
- Gutsche, C. D., 1998, Calixarenes revisited, Royal Society of Chemistry, p. 1-9.
- He, X., Wu, Z., Sun, Z., Wei, X., Wu, Z., Ge, X. ve Cravotto, G., 2018, A novel hybrid of  $\beta$ -cyclodextrin grafted onto activated carbon for rapid adsorption of naphthalene from aqueous solution, *Journal of Molecular Liquids*, 255, 160-167.
- Li, J.-M., Meng, X.-G., Hu, C.-W. ve Du, J., 2009, Adsorption of phenol, *p*-chlorophenol and *p*-nitrophenol onto functional chitosan, *Bioresource Technology*, 100 (3), 1168-1173.
- Memon, S., Akceylan, E., Sap, B., Tabakci, M., Roundhill, D. M. ve Yilmaz, M., 2003, Polymer supported calix[4]arene derivatives for the extraction of metals and dichromate anions, *Journal of Polymers and the Environment*, 11 (2), 67-74.

- Memon, S., Tabakci, M., Roundhill, D. M. ve Yilmaz, M., 2006, Synthesis and evaluation of the Cr(VI) extraction ability of amino/nitrile calix[4]arenes immobilized onto a polymeric backbone, *Reactive and Functional Polymers*, 66 (11), 1342-1349.
- Nayak, P. S. ve Singh, B. K., 2007, Removal of phenol from aqueous solutions by sorption on low cost clay, *Desalination*, 207 (1), 71-79.
- Ozcelik, E., Temel, F., Erdemir, S., Tabakci, B. ve Tabakci, M., 2019a, QCM sensors coated with calix[4]arenes bearing sensitive chiral moieties for chiral discrimination of 1-phenylethylamine enantiomers, *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*.
- Ozcelik, E., Temel, F. ve Tabakci, M., 2019b, Kaliksaren türevi immobilize edilmiş merrifield reçinesi ile kaplı QCM sensöründe sulu ortamda 4-nitrofenol algılanması, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (3), 595-603.
- Pedersen, C. J., 1968, Ionic complexes of macrocyclic polyethers, *Federation Proceedings*, 27 (6), 1305-1309.
- Rawajfih, Z. ve Nsour, N., 2006, Characteristics of phenol and chlorinated phenols sorption onto surfactant-modified bentonite, *Journal of Colloid and Interface Science*, 298 (1), 39-49.
- Tabakci, M., Memon, S., Yilmaz, M. ve Max Roundhill, D., 2004, Synthesis and evaluation of extraction ability of calix[4]-crown-6 cone conformer and its oligomeric analogue, *Reactive and Functional Polymers*, 58 (1), 27-34.
- Tabakci, M., Tabakci, B. ve Beduk, A. D., 2012, Synthesis and application of an efficient calix[4]arene-based anion receptor bearing imidazole groups for Cr(VI) anionic species, *Tetrahedron*, 68 (22), 4182-4186.
- Tabakci, M., 2008, Immobilization of calix[6]arene bearing carboxylic acid and amide groups on aminopropyl silica gel and its sorption properties for Cr(VI), *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 61 (1), 53-60.
- Temel, F. ve Tabakci, M., 2016, Calix[4]arene coated QCM sensors for detection of VOC emissions: Methylene chloride sensing studies, *Talanta*, 153, 221-227.
- Temel, F., Erdemir, S., Ozcelik, E., Tabakci, B. ve Tabakci, M., 2019a, Rapid and real-time detection of arginine enantiomers by QCM sensor having a calix[4]arene receptor bearing asymmetric centers, *Talanta*, 204, 172-181.
- Temel, F., Erdemir, S., Tabakci, B., Akpınar, M. ve Tabakci, M., 2019b, Selective chiral recognition of alanine enantiomers by chiral calix[4]arene coated quartz crystal microbalance sensors, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*.
- Temel, F., 2020a, One novel calix[4]arene based QCM sensor for sensitive, selective and high performance-sensing of formaldehyde at room temperature, *Talanta*, 211, 120725.
- Temel, F., 2020b, Real-time and selective recognition of erythromycin by self-assembly of calix[4]arene on QCM sensor, *Journal of Molecular Liquids*, 297, 111818.
- Temel, F., Turkyilmaz, M. ve Kucukcongar, S., 2020, Removal of methylene blue from aqueous solutions by silica gel supported calix[4]arene cage: Investigation of adsorption properties, *European Polymer Journal*, 125, 109540.
- Wei, W., Yin, X.-B. ve He, X.-W., 2008, pH-mediated dual-cloud point extraction as a preconcentration and clean-up technique for capillary electrophoresis determination of phenol and m-nitrophenol, *Journal of Chromatography A*, 1202 (2), 212-215.
- Yilmaz, A., Tabakci, B. ve Tabakci, M., 2009, New diamino derivatives of *p*-tert-butylcalix[4]arene for oxyanion recognition: synthesis and complexation studies, *Supramolecular Chemistry*, 21 (6), 435-441.
- Zhu, L., Chen, B. ve Shen, X., 2000, Sorption of phenol, p-nitrophenol, and aniline to dual-cation organobentonites from water, *Environmental Science & Technology*, 34 (3), 468-475.



## RADYOAKTIF PERTEKNETAT OKSO ANYONU ADSORPSİYONUNUN TERMODİNAMİK ANALIZI

<sup>1</sup>Fatih DEMİR , <sup>2</sup>Omer LACIN , <sup>3</sup>Burak BASTABAN 

Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Erzurum, TÜRKİYE  
<sup>2</sup>olacin@atauni.edu.tr

(Geliş/Received: 04.03.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.06.2019)

**ÖZ:** Kesikli sistemde çalışılan adsorpsiyon tekniği ile aktif karbon üzerine radyoaktif perteknetat okso anyonu ( $^{99m}\text{TcO}_4^-$ )'nun adsorpsiyon termodinamiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen verilerden faydalanarak termodinamik parametreler;  $\Delta H^\circ=0,346 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta S^\circ=0,029 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta G^\circ= -7,92$  (288 K) ile  $-8,78$  (318 K)  $\text{kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_x=0,28 \text{ kJ.mol}^{-1}$  ve standart serbest enerji değerinin sıfır olduğu sıcaklık 12 K olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular sonucunda adsorpsiyon prosesinin; fiziksel ve endotermik olarak gerçekleştiği ve 12 K'ın üzerindeki her sıcaklıkta adsorpsiyonun uygun ve kendiliğinden gerçekleşeceği bulguları elde edilmiştir. Sonuç olarak, belirli bir limitin üzerine çıktığında kansere neden olan radyoaktif teknesyumun aktif karbon üzerine adsorpsiyon termodinamik analizinin incelenmesi sonucu elde edilen bulguların endüstriyel çapta kurulacak bir tesis dizaynına katkıda bulunacağı söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Radyoaktif madde, Aktif Karbon, Termodinamik, Adsorpsiyon

### Thermodynamic Analysis of Radioactive Pertechetate Oxo Anion Adsorption

**ABSTRACT:** The aim of this study is to investigate thermodynamics of radioactive pertechetate okso anion ( $^{99m}\text{TcO}_4^-$ ) over the active carbon using the adsorption technique in batched systems. According to the obtained results thermodynamic parameters are calculated as  $\Delta H^\circ=0.346 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta S^\circ=0.029 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta G^\circ= -7.92$  (15°C) ile  $-8.78$  (45°C)  $\text{kJ.mol}^{-1}$ ,  $\Delta H_x=0,28 \text{ kJ.mol}^{-1}$  and also the temperature at which the standart free energy value equals to zero calculated as 12 K. These results indicated that the adsorption process is physical and endothermic and at temperatures over 12 K adsorption will take place spontaneously and favorably. In conclusion, it can be said that the results obtained from the thermodynamic analysis of radioactive technetium (which may cause cancer if the limit is exceeded) over the active carbon can contribute to the design of an industrial facility.

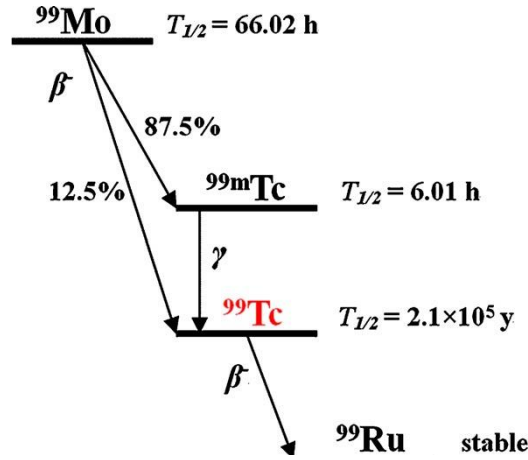
**Key Words:** Radioactive Substance, Activated Carbon, Thermodynamic, Adsorption

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nükleer tıp, insan vücudundaki çeşitli biyokimyasal ve fizyolojik işlemlere katılabilecek radyoaktif bileşikler yardımıyla tanusal görüntüleme ve tedavi uygulamalarını içeren bir bilim dalıdır. Bu bilim dalında en yaygın kullanılan radyoaktif element teknesyumdur (Hercigonja ve diğ. 2012).

Dünyadaki uranyum cevherlerinde nanogram miktarlarında bulunan teknesyum (Tc), nükleer reaktörlerde Mo, Ru ve Nb'un kozmik ışın reaksiyonu sonucu yapay olarak elde edilebilir. Plütonyum-239 ve uranyum-235'in termal fisyonu ile de % 6'lık bir verimle  $^{99}\text{Tc}$  üretilir (Leon ve

diğ.2005). İlk önce Perrier ve diğ. 1937'de, molibdeni, bir nötronla bombardıman ederek Tc sentezlemeyi başarmışlardır (Şekil 1) (Shia ve diğ. 2012).



Şekil 1.  $^{99}\text{Mo}$ 'nin bozunma şeması

Figure 1. Decayscheme of  $^{99}\text{Mo}$

Şekil 1'de görülebileceği gibi, Tc'nin en kararlı radyoaktif izotopu, 6 saatlik bir yarı ömre sahip  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 'dir. Bu izotop, gama ışınları yayarak  $^{99}\text{Tc}$ 'ye bozunur.  $^{99}\text{Tc}$ , 0,294 MeV'lik maksimum bozunma enerjisine sahip saf bir  $\beta^-$  yayıcı olduğundan dolayı, radyasyon sayımı ile ölçülebilir özelliğe sahiptir (Banavali ve diğ. 1995).

$^{99\text{m}}\text{Tc}$ , yeraltı sularını kirleten tehlikeli nükleer atıklardan biridir (Hercigonja ve diğ. 2012). Çünkü,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  ve % 0,9NaCl çözeltisi karıştırıldığında, izotonik, renksiz, berrak ve steril bir sodyum perteknetat solüsyonu elde edilir. Bu solüsyon tanı için doğrudan hastaya uygulanabilir. Solüsyondaki perteknetat okso anyonu ( $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$ ) çözünebilir olduğu için, yeraltı sularında çok önemli çevresel tehlikeler oluşturur (Bishop ve diğ. 2011).  $^{99}\text{Tc}$ 'nin immobilizasyonu uzun süreli ve kalıcı imha işlemlerinden önce yapılmalıdır. Bu nedenle, daha büyük miktarda atık üretmeden  $^{99}\text{Tc}$ 'nin uzaklaştırılması gereklidir (Del Cul ve diğ. 1993). Birleşik Devletler Çevre Koruma Ajansı (USEPA), içme sularında yıllık maksimum 0,04 milisievert (mSv) değerinde  $^{99}\text{Tc}$  içeriği olması gerektiğini belirlemiştir (USEPA, 2002). Bu değer aşılsa, insanların kansere yakalanması kaçınılmaz olacağı belirtilmiştir (Del Cul ve diğ. 1993).

Radyoaktif maddelerin sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında; kimyasal çöktürme, buharlaştırma, çözücü özütleme, membran prosesleri ve adsorpsiyon gibi çeşitli yöntemler uygulanmıştır (Mahmoud ve diğ. 2014). Çöktürme ve çözücü özütlemenin, düşük seçiciliğe ve büyük miktarlarda katı çamur oluşumuna sebep olduğu, (Sangvanich ve diğ. 2010), buharlaştırma yönteminin korozyon, kireçlenme veya köpüklenme gibi sorunlara yol açtığı (Rout ve diğ. 2006) ve membran proseslerinin, yüksek maliyet ve membran tıkanması gibi kısıtlamalara sahip olduğu (Fu ve Wang, 2011) belirtilmiştir. Adsorpsiyon yönteminin ise, düşük maliyet, esneklik ve tasarım basitliği, kullanım kolaylığı ve diğer tekniklere kıyasla toksik kirleticilere duyarsızlık gibi birçok avantaja sahip olduğundan dolayı daha çok tercih edilen bir yöntem olmuştur (Mahmoud ve diğ. 2014).

Literatürde adsorpsiyon yöntemiyle,  $^{99}\text{Tc}$ 'nin yeraltı sularından uzaklaştırılması için kullanılan bazı adsorbanlar şunlardır: alümina ve goetit (Kumar ve diğ. 2011), stibnit (Kumar ve diğ. 2013), elementel demir (Liang ve diğ. 1996), pirit ve manyetit (Lieser ve Bauscher, 1988, Farrell ve diğ. 1999), organofilik bentonitler (Bors ve diğ. 1999, Sakhira ve diğ. 2011) ve çeşitli sentetik reçineler (Suzuki ve diğ. 2009, Chen ve Veltkamp, 2002).

Aktif karbon, geniş yüzey alanı ve gözenekli yapıya sahip karbonlu ürünlerin ticari adıdır. Kontrollü bir atmosfer ve sıcaklık şartlarında, yüksek sıcaklıkta ısıl ayrışma ile karbon bazlı malzemelerden üretilir. Aktif karbonların genellikle yoğunluğu yaklaşık  $0,2 \text{ g.cm}^{-3}$ 'den büyük ve yüzey alanı  $400 -1600 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$  arasında değişmekte olup adsorplama kapasitesi çok büyüktür (Holm ve diğ. 2000).

Bu çalışmada, radyoaktif  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  ün sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında adsorpsiyon yöntemi tercih edilmiş ve adsorban olarak ise aktif karbon seçilmiştir. Adsorpsiyon prosesi sonucunda elde edilen termodinamik parametreler ışığında, adsorpsiyonun doğası hakkında bilgilerin sunulmasıyla endüstriyel çapta kurulacak bir tesis dizaynına katkıda bulunacağı amaçlanmıştır.

#### MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada radyoaktif  $^{99m}\text{TcO}_4^-$ , Atatürk Üniversitesi Tıp Fakültesi Nükleer Tıp Anabilim Dalından temin edilmiştir. Her deney için istenen sağımlarda  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  çözeltileri sağlanmıştır. Bu anyonun mol kütlesi  $163 \text{ g.mol}^{-1}$  olup dört hidrojen bağına sahiptir. Topolojik polar yüzey alanı  $73 \times 10^{-20} \text{ m}^2$  dir (PubChem, web).

Aktif karbon (Sigma-aldrichDarco G60) yerel bir medikal firmasından temin edilmiştir. Aktif karbonun bazı özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1** Aktif Karbonun Bazı Özellikleri

*Table 1. Some Properties of Activated Carbon*

| pH  | Ort. Boyut<br>(mm) | Yoğunluk<br>( $\text{g.cm}^{-3}$ ) | Yüzey<br>Alanı<br>( $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ ) | Saflık<br>% |
|-----|--------------------|------------------------------------|--|-------------|
| 5-7 | 0,044-0,15         | 0,45-0,55                          | 1100   | 99          |

Aktif karbon elenerek partikül boyutu  $+0,15-0,125 \text{ mm}$  olacak şekilde seçilmiştir.

Deneyler, kesikli sistemde çalışılan adsorpsiyon tekniği ile yapılmıştır. Başlangıç konsantrasyonu, pH, partikül boyutu, karıştırma hızı, adsorpsiyon denge süresi ve adsorban konsantrasyonu parametreleri sırasıyla;  $1,0 \text{ mCi.L}^{-1}$ , 8,0,  $+0,15-0,125 \text{ mm}$ , 700 rpm, 15 dakika ve  $2,0 \text{ g.L}^{-1}$  olarak sabit tutulmuştur (Bastaban, 2014).

#### Deneysel Yöntem (Experimental Set up)

$0,5 \text{ mCi.mL}^{-1}$   $^{99m}\text{TcO}_4^-$  çözeltilisinden 1 mL alınarak deiyonize su ile 500 mL’ye tamamlanmıştır. Böylece,  $1,0 \text{ mCi.L}^{-1}$  aktivitedeki  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  çözeltilisi elde edilmiştir. pH değeri, uygun bir miktarda 0,1 M NaOH (sigma-aldrich, %98) ve 0,1 M HCl (merck, %37) çözeltileri kullanılarak dijital bir pH-metre (Thermo Orion 3-Star) yardımıyla ayarlanmıştır.

Kesikli adsorpsiyon deneyleri, 288-318 K sıcaklık aralığında 700 mL hacmindeki bir ceketli reaktör sisteminde sabit tutulan parametre değerleriyle gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon denge süresi sonunda, nihai karışım nuçe erleniyle vakum altında süzölmüştür. Çözeltide, denge anındaki  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  ün radyoaktivitesi ( $C_e$ ), Biodex, Atomlab 400 model dose calibrator marka dozimetre kullanılarak ölçülmüş ve Eşitlik 1’den elde edilen  $q_e$  değerleri Çizelge 2’de verilmiştir.

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

Burada  $C_0$  ve  $C_e$  ( $\text{mCi.L}^{-1}$ ) sırasıyla,  $^{99m}\text{TcO}_4^-$  ün başlangıç ve denge radyoaktiviteleridir. V (L), çözelti hacmi, m (g), adsorbanın kütlesi ve  $q_e$  ( $\text{mCi.g}^{-1}$ ), adsorpsiyon kapasitesidir.

**Çizelge 2** Adsorpsiyonun Sıcaklıkla Değişim Verileri (konsantrasyon 1,0 mCi.L<sup>-1</sup> <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>, pH 8,0, partikül boyutu + 0,15-0,125 mm, karıştırma hızı 700 rpm, adsorpsiyon denge süresi 15 dk ve adsorban konsantrasyonu 2,0 g.L<sup>-1</sup>)

*Table 2. Change of adsorption by temperature (concentration 1.0 mCi.L<sup>-1</sup> <sup>99m</sup>TcO<sub>4</sub>, pH 8.0, particle size + 0.15-0.125 mm, mixing speed 700 rpm, adsorption equilibrium time 15 min. and adsorbent concentration 2.0 g.L<sup>-1</sup>)*

| Sıcaklık (K) | C <sub>e</sub> (mCi.L <sup>-1</sup> ) | q <sub>e</sub> (mCi.g <sup>-1</sup> ) |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 288          | 0,320                                 | 0,340                                 |
| 298          | 0,160                                 | 0,420                                 |
| 308          | 0,110                                 | 0,445                                 |
| 318          | 0,060                                 | 0,470                                 |

## BULGULAR VE SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULT AND DISCUSSION)

### Adsorpsiyon Termodinamiğinin Modellenmesi (Modeling of Adsorption Thermodynamics)

Adsorpsiyon prosesinde denge anına ulaşıldığında, hem çözeltilerde hem de katı yüzeyinde adsorplanan maddenin konsantrasyonunda bir değişim gözlemlenmez. Çünkü dengede Gibbs serbest enerji değişimi ( $\Delta G^0 = 0$ ) sıfırdır ve adsorpsiyon ve desorpsiyon hızları birbirine eşittir. Böylece adsorban yüzeyine adsorplanan maddenin ve sulu çözeltildeki adsorplanmadan kalan maddenin aktiviteleri oranı sabit kalır ve bu oran denge sabiti ( $K_c$ ) olarak adlandırılır. Bu sabit Eşitlik 2 ile hesaplanır (Atkins ve Paula, 2014).

$$K_c = \frac{a_s}{a_e} = \frac{\gamma_s C_s}{\gamma_e C_e} \quad (2)$$

Burada  $a_s$  ve  $a_e$  sırasıyla; denge anında adsorban yüzeyine adsorplanan maddenin ve sulu çözeltildeki adsorplanmadan kalan maddenin aktiviteleridir.  $\gamma_s$  ve  $\gamma_e$  ise sırasıyla denge anında adsorban yüzeyine adsorplanan maddenin ve sulu çözeltildeki adsorplanmadan kalan maddenin aktivite katsayılarıdır.  $C_s$  ve  $C_e$  ise; denge anında adsorban yüzeyine adsorplanan maddenin ve sulu çözeltildeki adsorplanmadan kalan maddenin konsantrasyonlarıdır. Aktivite katsayılarının yaklaşık aynı olduğu kabul edilirse,

$$K_c = \frac{C_s}{C_e} \quad (3)$$

Eşitlik 3 yazılabilir. Ayrıca, Van'tHoff eşitliği yazılırsa (Atkins ve Paula, 2014),

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln(K_c) \quad (4)$$

Burada;  $\Delta G$ , serbest enerji değişimi, R ideal gaz sabiti (8,314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>), T, mutlak sıcaklık (K) ve  $K_c$ , denge sabitidir.  $\Delta G$  değeri denge anında sıfır olacağından, Eşitlik 5'e indirgenir.

$$\Delta G^0 = -RT \ln(K_c) \quad (5)$$

Bu eşitlik, adsorpsiyon prosesinin kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini tahmin etmek için kullanılan önemli bir eşitliktir.  $\Delta G^0$ , adsorpsiyon prosesinin serbest enerji değişimidir.

Ayrıca,  $\Delta G^0$ ' için aşağıdaki termodinamik eşitlik te yazılabilir (Atkins ve Paula, 2014)

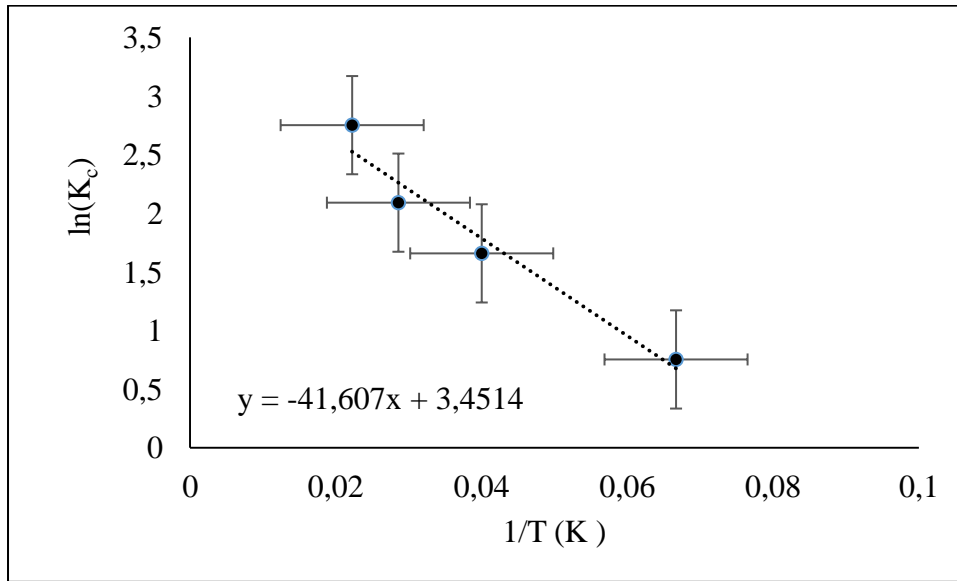
$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 \quad (6)$$

Eşitlik 5 ve 6'dan,

$$\ln(K_c) = -\frac{\Delta H^0}{RT} + \frac{\Delta S^0}{R} \quad (7)$$

Eşitlik 7 elde edilir. Bu eşitlikten faydalanarak  $\ln K_c$  ya karşı  $1/T$  grafiği çizilirse (Şekil 2), eğimden  $\Delta H^0$  ve kesme noktasından  $\Delta S^0$  değerleri belirlenir.





Şekil 2. ln(K<sub>c</sub>)'ye karşı 1/T grafiği

Figure 2. ln (K<sub>c</sub>) vs. 1/T graph

Şekil 2'nin eğiminden  $\Delta H^\circ$ , kesmesinden  $\Delta S^\circ$  ve Eşitlik 5'den  $\Delta G^\circ$  değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. Termodinamik Parametreler

Table 3. Thermodynamic Parameters

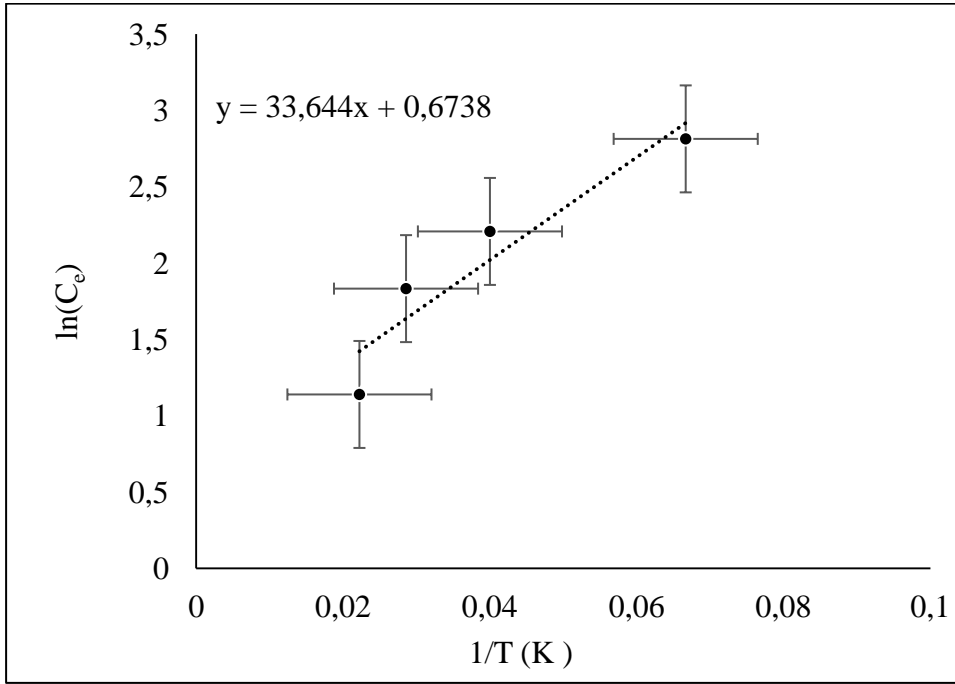
| $\Delta H^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> ) | $\Delta S^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> ) | $\Delta G^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> ) |       |       |       |
|--|--|--|-------|-------|-------|
|  |  | 288 K                                    | 298 K | 308 K | 318 K |
| 0,346                                    | 0,029                                    | -7,92                                    | -8,20 | -8,49 | -8,78 |

$\Delta H^\circ$  ve  $\Delta S^\circ$  değerlerinin pozitif çıkması ve  $\Delta G^\circ$  değerinin negatif çıkması nedeniyle adsorpsiyon prosesinin sırasıyla, endotermik, adsorban-adsorblanan arayüzeyinde düzensizlik artışı ve kendiliğinden gerçekleşen bir proses olduğunu gösterir. Sıcaklık arttıkça  $\Delta G^\circ$ 'nin negatif değerinin artması, yüksek sıcaklıklarda perteknetat okso anyonunun aktif karbon üzerine adsorpsiyonuna olumlu etkide bulunduğunu gösterir. Benzer sonuçlar Mahmoud ve Seliman, 2014, çalışmasında da bulunmuştur.

#### Adsorpsiyon İzosterik Isısı(Isosteric Adsorption Heat)

Sabit adsorblanan miktar için tanımlanan izosterik adsorpsiyon ısısı ( $\Delta H_x$ , kJmol<sup>-1</sup>), adsorpsiyon prosesinin karakterizasyonu ve optimizasyonu tahmininde faydalı parametrelerden biri olup Clausius–Clapeyron (Eşitlik 8) eşitliğine göre ln C<sub>e</sub>'ye karşı 1/T grafiğinin eğiminden hesaplanır (Şekil 3) (Chowdhury ve diğ. 2011).

$$\frac{d(\ln(C_e))}{dt} = -\frac{\Delta H_x}{RT^2} \quad (8)$$



Şekil 3.  $\ln(C_e)$ 'ye karşı  $1/T$  grafiği

Figure 3.  $\ln(C_e)$  vs.  $1/T$  graph

Fiziksel adsorpsiyon için  $\Delta H_x$ ,  $80 \text{ kJ.mol}^{-1}$ 'den küçük ve kimyasal adsorpsiyon için ise  $80\text{-}400 \text{ kJ.mol}^{-1}$  arasında değişmelidir (Doğan ve Alkan, 2003). Şekil 3'ün eğiminden  $\Delta H_x$  değeri  $0,28 \text{ kJ.mol}^{-1}$  olarak bulunduğu adsorpsiyon prosesinin fiziksel adsorpsiyona uyduğu söylenebilir.

#### Kendiliğinden Gerçekleşen Olaylarda Termodinamik Kriter (*Thermodynamic Criteria for Spontaneity*)

Bir adsorpsiyon prosesinin termodinamik olarak uygun ve kendiliğinden olup olmadığı  $\Delta G^\circ$ 'in işaretine bakılarak belirlenebilir. Eğer  $\Delta G^\circ$  sıfırdan küçükse adsorpsiyon süreci uygun ve kendiliğinden gerçekleşir.  $\Delta G^\circ$ 'ın alacağı işaret,  $\Delta H^\circ$  ve  $\Delta S^\circ$  gibi termodinamik parametrelere bağlıdır. Bu durum aşağıdaki gibi açıklanabilir (Atkins ve Paula, 2014);

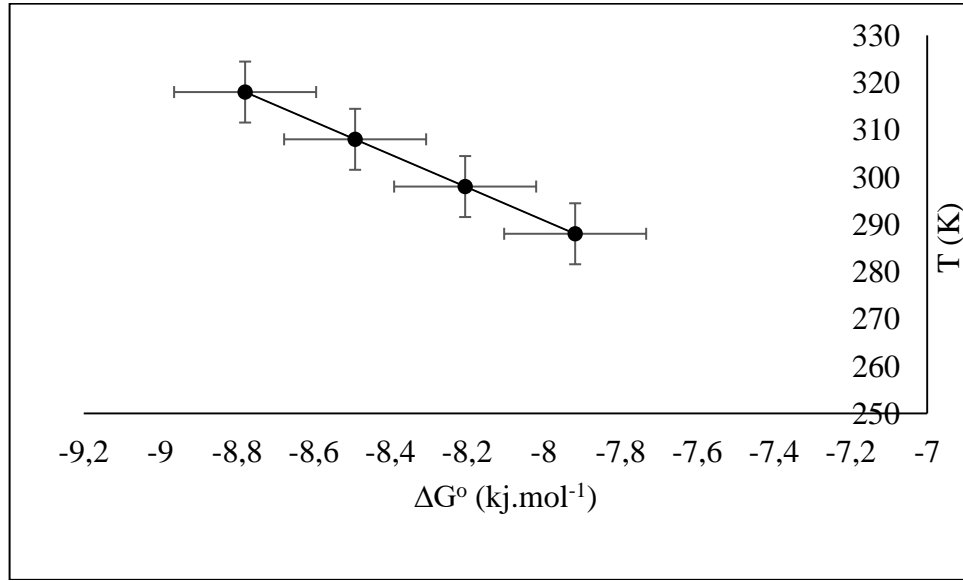
a) Eğer adsorpsiyon süreci ekzotermik ise ( $\Delta H^\circ$  negatif) ve katı sıvı ara yüzeyinde düzensizlik artmış ( $\Delta S^\circ$  pozitif) ise, sıcaklık ne olursa olsun adsorpsiyon süreci her zaman uygun ve kendiliğinden ( $\Delta G^\circ$  negatif) dir

b) Eğer adsorpsiyon süreci ekzotermik ise ( $\Delta H^\circ$  negatif) ve katı sıvı ara yüzeyinde düzensizlik azalmış ( $\Delta S^\circ$  negatif) ise,  $\Delta H^\circ$  değerinin  $T\Delta S^\circ$ 'den büyük olması durumunda, adsorpsiyon süreci uygun ve kendiliğinden ( $\Delta G^\circ$  negatif) dir

c) Eğer adsorpsiyon süreci endotermik ise ( $\Delta H^\circ$  pozitif) ve katı sıvı ara yüzeyinde düzensizlik artmış ( $\Delta S^\circ$  pozitif) ise,  $\Delta H^\circ$  değerinin  $T\Delta S^\circ$ 'den küçük olması durumunda, adsorpsiyon süreci uygun ve kendiliğinden ( $\Delta G^\circ$  negatif) dir

d) Eğer adsorpsiyon süreci endotermik ( $\Delta H^\circ$  pozitif) ise ve katı sıvı ara yüzeyinde düzensizlik azalmış ( $\Delta S^\circ$  negatif) ise, adsorpsiyon süreci uygun ve kendiliğinden ( $\Delta G^\circ$  negatif) gerçekleşeceği hiç bir sıcaklık yoktur.

Bu açıklamalara göre adsorpsiyon süreçleri sadece belirli şartlarda kendiliğinden gerçekleşebilir. Adsorpsiyon süreçlerinde uygun sıcaklık aralığı,  $\Delta G^\circ$  in sıfır olduğu sıcaklık ( $T_0$ ) değerine göre belirlenir. Bu sıcaklık değeri,  $\Delta G^\circ$ 'a karşı  $T$ 'nin grafik edilmesiyle bulunur (Şekil 4). Doğrunun kesme noktasından,  $\Delta G^\circ$ 'ın sıfır olduğu sıcaklık değeri bulunarak adsorpsiyon prosesinin uygun ve kendiliğinden gerçekleştiği aralık belirlenir.



Şekil 4.  $\Delta G^\circ$ 'a karşı T grafiği

Figure 4.  $\Delta G^\circ$  vs. T graph

Şekil 4'teki doğrunun kesme noktası olan  $\Delta G^\circ$ 'ın sıfır olduğu sıcaklık, 12 K olarak bulunmuştur. Bu değerler üzerindeki sıcaklıklarda, adsorblanan-adsorban ara yüzeyinde serbest enerjide daha fazla azalma olacağı için adsorpsiyon prosesi uygun ve kendiliğinden gerçekleşeceği söylenir. Özellikle adsorpsiyonun gerçekleşeceği sıcaklık aralığının bulunması, endüstriyel ölçekte optimum çalışma sıcaklığının belirlenmesinde önemli bir bilgi sağlamaktadır.

#### SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, aktif karbon üzerine radyoaktif perteknetat okso anyonunun adsorplanabilirliğini ve kendiliğinden gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini tahmin edebilmek için termodinamik analizi incelenmiştir. Çizelge 2'deki verilerden sıcaklığın artmasıyla adsorpsiyon kapasitesinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte,  $\Delta H^\circ$ 'ın pozitif ( $0,346 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ) çıkması da adsorpsiyon prosesinin endotermik tepkimeyle yürüdüğünü göstermektedir.  $\Delta S^\circ$  değerinin pozitif çıkması ( $0,029 \text{ kJ.mol}^{-1}$ ), adsorban-adsorblanan ara yüzeyinde düzensizlik artışı olduğunu göstermektedir.  $\Delta G^\circ$  değerlerinin negatif çıkması ( $-7,92$  (288 K) ile  $-8,78$  (318 K)  $\text{kJ.mol}^{-1}$ ) ve  $\Delta G^\circ$ 'ın sıfır olduğu sıcaklığın 12 K olarak hesaplanması, adsorpsiyon prosesinin bu değerler üzerindeki her sıcaklıkta uygun ve kendiliğinden gerçekleşeceğini ifade etmektedir.  $\Delta H_x$  değeri,  $0,28 \text{ kJ.mol}^{-1}$  olarak bulunmuş ve  $80 \text{ kJ.mol}^{-1}$ 'den küçük olduğu için adsorpsiyon prosesinin fiziksel olarak gerçekleştiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, belirli bir limitin üzerine çıktığında kansere neden olan radyoaktif teknesyumun aktif karbon üzerine adsorpsiyon termodinamik analizinin incelenmesi sonucu elde edilen bulguların endüstriyel çapta kurulacak bir tesis dizaynına katkıda bulunacağı söylenebilir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

Banavali, A.D., Raimondi, J.M., Moreno, E.M., McCurdy, D.E., 1995, "The determination of technetium-99 in low-level radioactive waste", *Radioact. Radiochem.*, 6, 26–35.

Bastaban, B., 2014, "Teknesyum ( $^{99m}\text{Tc}$ ) Elementinin Aktif Karbon Yardımıyla Adsorpsiyonu" Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Bishop, M.E., Dong, H., Kukkadapu, R.K., Liu, C., Edelman, R.E., 2011, "Bioreduction of Fe-bearing clay minerals and their reactivity toward pertechnetate ( $\text{Tc-99}$ )", *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75, 5229–5246.

Bors, J., Dultz, S., Riebe, B., 1999, "Retention of radionuclides by organophilic bentonite", *Eng. Geol.*, 54, 195–206.

Chen, J., Veltkamp, J.C., 2002, "Pertechnetate removal by macroporous polymer impregnated with 2-nitrophenyl octyl ether (NPOE)", *Solvent Extr. Ion Exch.*, 20, 515–524.

Chowdhury, S., Mishra, R., Saha, P., & Kushwaha, P., 2011, "Adsorption thermodynamics, kinetics and isosteric heat of adsorption of malachite green onto chemically modified rice husk", *Desalination*, 265(1-3), 159-168.

Del Cul, G.D., Bostick, W.D., Trotter, D.R., Osborne, P.E., 1993, "Technetium-99 removal from process solutions and contaminated groundwater", *Sep. Sci. Technol.*, 28, 551–564.

Farrell, J., Bostick, W., Jarabek, R.J., Fiedor, J., 1999, "Electrosorption and reduction of pertechnetate by anodically polarized magnetite", *Environ. Sci. Technol.*, 33, 1244–1249.

Fu, F., Wang, Q., 2011, "Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review", *J. Environ. Manage.*, 92, 407–418.

Hercigonja Radmila V., Maksin Danijela D., Nastasovic' Aleksandra B., Trifunovic' Snežana S., Glodic' Pavle B., Onjia Antonije E., 2012, "Adsorptive Removal of Technetium-99 Using Macroporous Poly (GMA-co-EGDMA) Modified with Diethylene Triamine", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, 1273–1282.

Holm, E., Gäfvert, T., Lindahl, P., & Roos, P. 2000, "In situ sorption of technetium using activated carbon", *Applied Radiation and Isotopes*, 53(1-2), 153-157.

Kumar, P.S., Senthamarai, C., Sai Deepthi, A.S.L., Bharani, R., 2013, "Adsorption isotherms, kinetics and mechanism of Pb(II) ions removal from aqueous solution using chemically modified agricultural waste", *Can. J. Chem. Eng.* 91, 1950–1956.

Kumar, S., Rawat, N., Kar, A.S., Tomar, B.S., Manchanda, V.K., 2011, "Effect of humic acid on sorption of technetium by alumina", *J. Hazard. Mater.*, 192, 1040–1045.

León, M.G., 2005, "99Tc in the Environment: Sources, Distribution and Methods", *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 6, 253–259.

Liang, L., Gu, B., Yin, X., 1996, "Removal of technetium-99 from contaminated ground water with sorbents and reductive materials", *Sep. Technol.* 6, 111–112.

Lieser, K.H., Bauscher, C.H., 1988, "Technetium in the hydrosphere and in the geosphere. II. Influence of pH, of complexing agents and of some minerals on the sorption of technetium", *Radiochim. Acta*, 44, 125–128.

Dogan, M., Alkan, M., 2003, "Removal of methyl violet from aqueous solution by perlite", *J. Colloid Interface Sci.*, 267, 32–41.

Mahmoud, M. R., Seliman, A. F. 2014, "Evaluation of silica/ferrocyanide composite as a dual-function material for simultaneous removal of 137Cs+ and 99TcO4- from aqueous solutions", *Applied Radiation and Isotopes*, 91, 141-154.

Peter Atkins and Julio de Paula, 2014, *Physical Chemistry 10th Edition* Edition- 10th Edition oxford university press-new delhi.

Pubchem, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/SODIUM%20PERTECHNETATE#section=Related-Compounds-with-Annotation>.

Rout, T.K., Sengupta, D.K., Besra, L., 2006, "Flocculation improves uptake of 90Sr and 137Cs from radioactive effluents", *Int. J. Miner. Process.*, 79, 225–234.

Sangvanich, T., Sukwarotwat, V., Wiacek, R.J., Grudzien, R.M., Fryxell, G.E., Addleman, R.S., Timchalk, C., Yantasee, W., 2010, "Selective capture of cesium and thallium from natural waters and simulated wastes with copper ferrocyanide functionalized mesoporous silica", *J. Hazard. Mater.*, 182, 225–231.

Shakira, K., Ghoneimya, H.F., Hennawy, I.T., Elkafrawy, A.F., Beheira, S.G.E., Refaata, M., 2011, "Simultaneous removal of chromotrope 2B and radionuclides from mixed radioactive process wastewater using organo-bentonite", *Eur. J. Chem.*, 2, 83–93.

Shia Keliang, HouaXiaolin, Roos Per, Wu Wangsuo, 2012, "Determination of technetium-99 in environmental samples: A review", *Analytica Chimica Acta*, 709, 1– 20.

Suzuki, T., Fujii, Y., Yan, W., Mimura, H., Koyama, S., Ozawa, M., 2009, "Adsorption behavior of VII group elements on tertiary pyridine resin in hydrochloric acid solution", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 282, 641–644.

USEPA, 2002, "EPA facts about technetium-99", <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-technetium-99>



## EVALUATION OF POZZOLAN-LIME STABILIZATION ON PHYSICAL PROPERTIES OF FINE SANDY ENGINEERING FILLS

Babak JAMHIRI 

*Master of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, IRAN*

bjamhiri@gmail.com

(Geliş/Received: 28.02.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.06.2019)

**ABSTRACT:** Loose sands are susceptible to the earthquake due to lack of strength and even saturated sands may experience liquefaction. To address problems in loose fine sands, in this article, hydrated lime and zeolite as one of the pozzolanic methods for soil improvement are instrumented together to improve fine sandy soils' compaction properties. To provide aid for practical compaction of fine sandy soils, physical properties of treated soils with 3, 4 and 5 percent of lime and 8, 10 and 12 percent of zeolite are investigated. A series of Proctor tests, Specific Gravity of soil's solids and Minimum Index Density was performed to obtain maximum dry density and index void ratios. Additionally, the hydration rate of zeolite is modeled by Arrhenius method to quantify the effective duration of hydration process. Results showed that application of zeolite led to a better compaction property while treated soils only with lime did not show any improvement.

**Key Words:** Soil improvement, Zeolite, Simulation of hydration, Arrhenius equation

### İnce Kumlu Mühendislik Dolgularının Fiziksel Özellikleri Üzerine Pozzolan-Kireç Stabilizasyonunun Değerlendirilmesi

**ÖZ:** Gevşemiş kumlar, mukavemet eksikliğinden dolayı depreme karşı hassastır ve doymuş kumlar bile sıvılaştırılabilir. Gevşek ince kumlardaki sorunları ele almak için, bu makalede, zemin iyileştirme için pozzolanik yöntemlerden biri olan hidratlı kireç ve zeolit, ince kumlu zeminlerin sıkıştırma özelliklerini geliştirmek için birlikte kullanılmıştır. İnce kumlu zeminlerin pratik olarak sıkıştırılmasına yardımcı olmak için, işlenmiş zeminin yüzde 3,4 ve 5 oranında kireç ve yüzde 8,10 ve 12 oranında zeolitle birlikte fiziksel özellikleri incelenmiştir. Maksimum kuru yoğunluğu ve indeks boşluk oranlarını elde etmek için bir seri Proctor testi, zeminin Özgül ağırlığı ve asgari endeksi yoğunluk yapılmıştır. Ek olarak, zeolitin hidrasyon hızı, hidrasyon işleminin etkin süresini ölçmek için modellenmiştir. Sonuçlar, zeolit uygulamasının daha iyi bir sıkıştırma özelliğine yol açtığını, ancak yalnızca kireçle muamele edilmiş topraklarda herhangi bir gelişme olmadığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Zemin iyileştirme, Zeolit, Hidrasyon modeli, Arrhenius denklemi

## INTRODUCTION

Application of natural pozzolans with lime to improve weak soils, dates back to thousands of years. Today zeolites as an eco-friendly pozzolan with alumina-silicate structure is being used in many environmental and industrial processes such as a cement replacement pozzolan in concrete technology. A zeolite-cement mixture generates less heat of hydration compared to other commonly used

supplementary cementitious materials (SCM) such as silica fume and metakaolin, which are extremely expensive or not fully investigated in terms of their suitability; this is likely due to the removal of cement from the system and shorter initial and final setting times than that of the plain mixture (Ahmadi and Shekarchi 2010; Najimi et al. 2012). Additionally, durability properties of concrete containing zeolite proved to have a considerable effect on water penetration, chloride ion penetration, corrosion rate and drying shrinkage of concrete. Furthermore, cements containing natural zeolite exhibit improved resistance to sulfate attack and reduced the ettringite formation (Karakurt and Topcu 2009; Valipour et al. 2013).

Snellings et al. (2009) studied early pozzolanic reactions in pastes of lime and natural zeolites; for pastes containing chabazite and Na-, K-, and Ca-exchanged clinoptilolite tuffs, they showed that alkali-exchanged clinoptilolites produced a higher pozzolanic reactivity, a more permeable reaction product layer and longer silicate chains in the calcium silicate hydrate phase compared to their Ca-exchanged counterpart. Additionally, they concluded that the exchangeable cation content of clinoptilolite influences the duration of the initial setting time and the beginning of hardening and hydration rate of zeolite lime blend. Varela et al. (2006) compared the pozzolanic activity of two zeolitic rocks from two Cuban deposits and found that Carolinas rocks containing sub automorphic and automorphic heulandite or clinoptilolite crystals had a lower reaction rate with portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). This result was related not to the particle size distribution of the materials but to their soluble  $\text{SiO}_2$  content and mineralogy. Numerous studies on zeolite practical applications in concrete technology are indicating that use of zeolite in soil stabilization which follows a similar pattern could be a beneficial practice for soil and road practitioners specially due to quick initial hydration and setting time of pozzolanic reaction which will expedite compaction of fine to clean sandy soils.

Thus, as available data in literature regarding compacting soils with zeolite and lime as engineering fills for embankments or road paving material are deficient, and as fine saturated sands are prone to major disasters such as liquefaction (Jamhiri and Parsaeimaram 2019; Jamhiri et al. 2020), in this study to provide a practical knowledge of compaction properties of zeolite-lime stabilized fine sandy soils as a method of soil stabilization, a series of Standard Proctor tests, Specific Gravity of soil's solids and Maximum and Minimum Index Density was performed on treated soils to demonstrate the effect of zeolite and lime with or without each other when using them in soil stabilization. To extend the comprehension of the data reported in this paper, different percentage amount of zeolite and lime were used and significant physical soil parameters such as maximum dry density, optimum moisture content, maximum and minimum-index void ratio were identified. In reference to the fact that practical compaction of soils with lime and pozzolan depends mainly on hydration rate rather than pozzolanic reaction at early ages of application, in this study an analytical simulation is performed on zeolite and lime hydration rate and X-ray Diffraction Analysis is utilized to trace the produced hydration products.

## MATERIALS

The results of the parent soil characterization tests including Direct Shear (DS) test and soil gradation using sieve analysis are shown in Table 1. Grain-size distribution curve of soil and laser particle analysis of zeolite are shown in Figure 1 (a and b), respectively. This soil is classified as poorly graded sand (SP) according to the Unified Soil Classification System and micronized zeolite is of clinoptilolite kind. Dry hydrated lime was used as the co-binding agent. The specific gravity of the lime grains is 2.49. For the characterization tests, distilled water was used, but for molding specimens the other tests, tap water was used. To establish logical conclusions, soil specimens were prepared in different percentages as shown in Table 2.

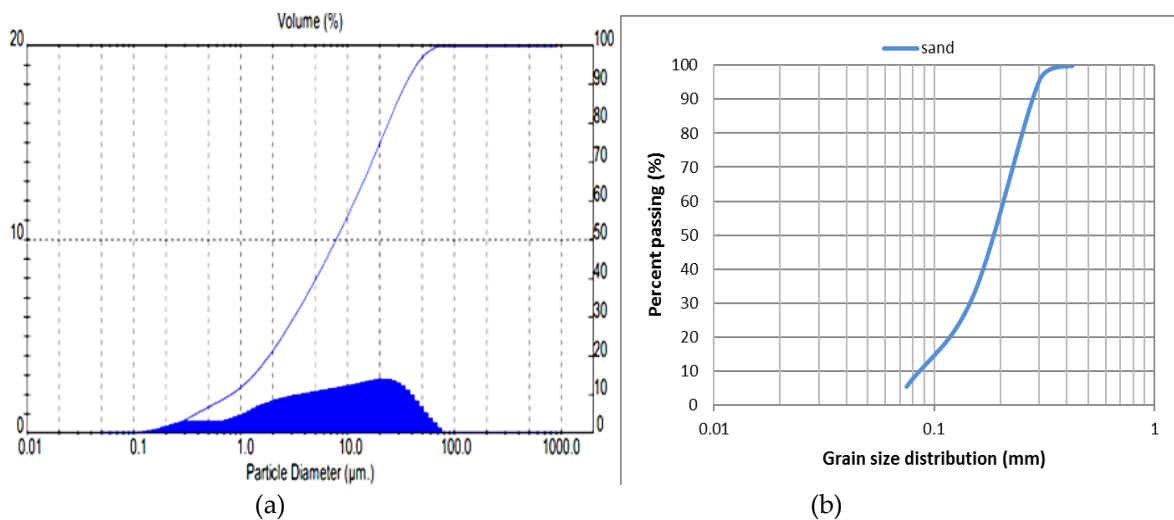
**Table 1.** Physical and mechanical characteristics of studied fine sand

| Soil Property                            | Amount |
|--|--------|
| Cu                                       | 2.22   |
| Cc                                       | 1.42   |
| D <sub>10</sub>                          | 0.09   |
| D <sub>60</sub>                          | 0.2    |
| Specific Gravity                         | 2.65   |
| Optimum Moisture Content (%)             | 15.6   |
| Maximum Dry Density (KN/m <sup>3</sup> ) | 15.77  |
| Cohesion Intercept (kPa)                 | 0.2    |
| Internal Friction Angle (Degree)         | 30     |

**Table 2.** Specimen each type of mixture (L zeolite)

preparation dosage for stands for lime and Z is

|    |       |        |        |    |       |        |        |    |       |        |        |
|----|-------|--------|--------|----|-------|--------|--------|----|-------|--------|--------|
| 1  | 2     | 3      | 4      | 5  | 6     | 7      | 8      | 9  | 10    | 11     | 12     |
| 3L | 3L+8Z | 3L+10Z | 3L+12Z | 4L | 4L+8Z | 4L+10Z | 4L+12Z | 5L | 5L+8Z | 5L+10Z | 5L+12Z |

**Figure 1.** (a) Laser Particle Size Analysis distribution curve obtained by Malvern Mastersizer Instrument

(b) Grain size distribution and unified classification of plain sand

## EXPERIMENTAL PROGRAM

To reach a uniform mixture, all additives including 3, 4 and 5 percent of lime and 8, 10 and 12 percent of zeolite were properly mixed with the oven dried sandy soil for half an hour according to the preparation dosage shown in Table 2. Afterwards, compaction characteristics of the stabilized soil have been achieved by using standard proctor test according to ASTM D698. Additionally, specific gravity of soil's solid is separately identified for each mixture as the ratio of dried mass of stabilized soil to the mass of water of the equal volume. Specific gravity of soil's solid in this article is defined in accordance with ASTM D854. To investigate physical changes in the mixtures and to quantify the amount of void pore space, maximum and minimum index void ratios also were determined by replacing each

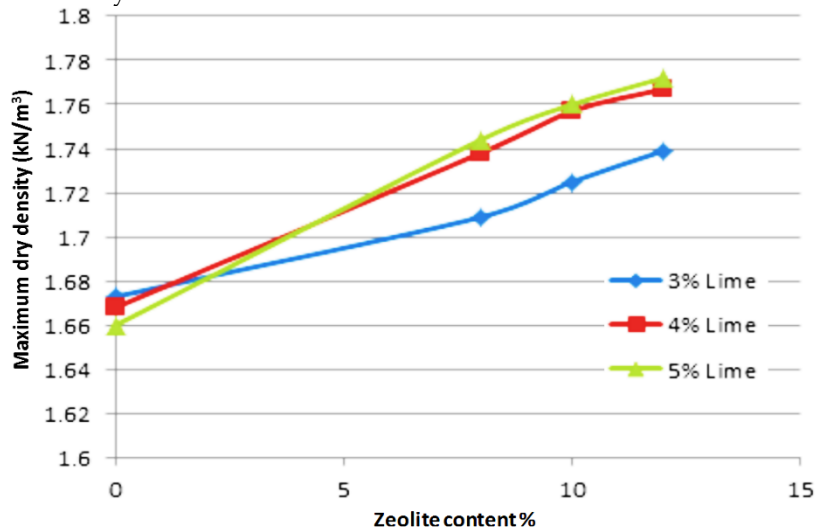


corresponding maximum and minimum dry densities according to D 4254 – 00. Considering that during field compaction relative density of subjected soil ( $D_r$  %) should meet at least 90 percent of its counterpart in laboratory compaction, all remolded specimens were made to reach required relative density. With the aim of getting high accuracy of the results, each test was performed twice, and the average results were reported for further analysis.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Maximum Dry Density and Zeolite Content

The results of standard proctor tests on mixed samples are shown in Figure 2. The aim of the test is to establish a graph including maximum dry density that may be obtained for a given soil with standard attempts of compaction effort. When a series of compaction efforts is gradually performing at different water contents resulted plot of compaction usually shows a distinct peak. Accordingly, the curve is drawn with axes of dry density and moisture content with the peak representing the maximum dry density at optimized moisture content. Figure 2, indicates that with the increase of zeolite content, maximum dry density increases. One of the reasons could be that as parent soil is a poorly granular soil, in general, addition of micronized zeolite will lead to a change in soil's gradation and an increase of the fine fraction and consequently production of a well graded soil. Insertion of lime in conjunction with zeolite in the soil also showed a similar trend which is due to the fact that as zeolite carries a negative anion charge it tends to absorb positive cations in a mixture of water solution and this leads to the creation of diffused double layer water.



**Figure 2.** Variations of maximum dry density with variations of zeolite content

Double layer water predominantly is absorbed to the surface of clayey soils because clays are charged particles. While in the case of fine granular soils such a complex layer does not exist. But with the presence of solved zeolite in water and co-absorption of lime; hydration and pozzolanic reactions begin. Mertens et al. (2009) who investigated the pozzolanic reactions among different types of natural rich pozzolans, indicated that finer grain sizes or higher surface areas of pozzolans generally lead to a higher short-term pozzolanic activity, whereas hydration rate influences only the short-term reactivity, while pozzolanic reaction had an effect on both the long- and short-term reactivity. So as field compaction of soils is significantly dependent on early stages of mixing and a reliable design procedure is not accountable until it gets confirmation both in practice and also in simulated analysis and as it was addressed by Mertens et al. (2009) short-term reactivity of mixed soil is mainly controlled by degree of hydration. Thus, to certify the spread of hydration process with the implementation of the affinity

hydration model (Jendele et al. 2013; da Silva et al. 2015) the rate and extent of hydration is modeled to weight the share of influence of binder hydration on compaction parameters.

### Simulation of Zeolite and Lime Hydration Process

It is believed that at early stages of zeolite lime reaction, pozzolanic reaction is prevailed considerably by hydration of calcium hydroxide with alkali exchanged clinoptilolite (Mertens et al. 2009). The first consequence of hydration is the presence of a new phase belonging to the AFm group (namely calcium carbolaluminate hydrate such as C<sub>3</sub>S) – which is based on pozzolanic reaction between calcium hydroxide and aluminates in the zeolite. The consumption of the C<sub>3</sub>S phase and crystallization of the CH phase and deceleration of the hydration rate is generally considered to be caused by the dormant inducing period of zeolite and thickening of following calcium silicate hydrate chains (C–S–H) barrier layer on the C<sub>3</sub>S surface. However, compare to cement systems, the mineral phases C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S will be lower than the detection limit in tested samples in regular detecting analyses; implying that these types of phases became fully hydrated during the early stage of curing and do not contribute to future strength developments. This observation was also simulated by affinity hydration model proposed by da Silva et al. 2013 and Jendele et al. 2013 with some minor adjustments, owing to the different nature of the binding agent in those studies. The affinity hydration model adjusts all stages of cement blends hydration under isothermal temperature. The used methods for simulating hydration progress mainly are based on amount of consumed Ca(OH)<sub>2</sub>, released heat of hydration, chemically bound water content and loss of volume due to drying shrinkage. The affinity hydration model incorporates chemical affinity, at any specific degree of hydration (DoH), but under varying temperature via Arrhenius equation as follows:

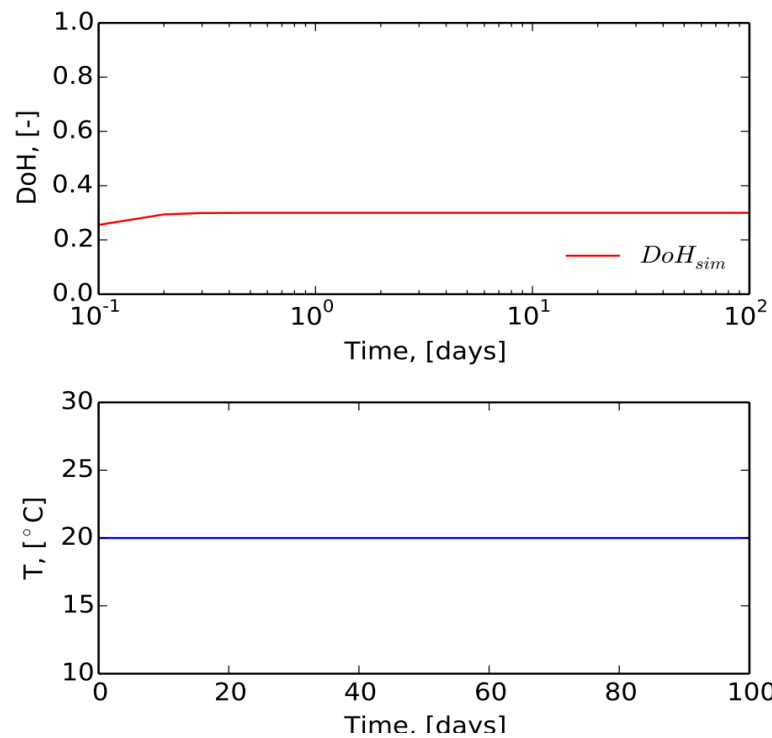
$$\bar{A}_r = \bar{A}_{25} \times \exp \left[ \frac{E_a}{R} \times \left( \frac{1}{298.15} \right) - \frac{1}{T} \right] \quad (1)$$

where R [Jmol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>] is the universal gas constant and E<sub>a</sub> [Jmol<sup>-1</sup>] is the apparent activation energy dependent of assumed binder fineness (da Silva et al. 2013 and Jendele et al. 2013). DoH is assumed as a function of Water-binder ratio and T is the average temperature of sealed samples which is scaled down to the correspond original chemical affinity assumption of isothermal curing temperature of 25°C in the model and 20°C in this study.

Table 3 represents adjusted parameters in simulation of degree of hydration in which all mineral phases such as C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S (3CaO.SiO<sub>2</sub>) and C<sub>4</sub>AF were set both to those reported in the literature (Vogiatzis et al. 2012) and XRF (X-ray fluorescence) of the binder in accordance with the minimum range of detection limit of XRD apparatus so that degree of hydration can be computed with higher precision. Some modification must be taken into account in model properties such as replacing cement to water ratio to cement to binder (zeolite-lime) ratio and real field condition equalized to isothermal curing in 20°C. Additionally, it is assumed logically that as samples were prepared using optimum moisture content varying about 12 to 14 percent, in simulated model the minimum value was used to account for worth case scenario where in reality samples lose water during preparation.

**Table 3.** XRF experimental binder properties and estimated parameters by simulated affinity model

| setting     | parameter                       |
|-------------|---------------------------------|
| 0.08        | C <sub>3</sub> S [-]            |
| 0.02        | C <sub>2</sub> S [-]            |
| 0.03        | C <sub>3</sub> A [-]            |
| 0.03        | C <sub>4</sub> AF [-]           |
| 7800        | BLAINE [m <sup>2</sup> /kg]     |
| 0.12        | Water to binder ratio [C]       |
| 1.165       | B1 [1/h]                        |
| 0.308       | B2 [-]                          |
| 0.086       | ETA [-]                         |
| 0.3         | DoH_inf [-]                     |
| 73967.<br>7 | Activation Energy [J/mol]       |
| 83.78       | Potential Heat [J/g]            |
| 0.1         | Step size [days]                |
| 1           | Sealed & Isothermal Curing 20°C |

**Figure 2.** Simulated degree of hydration (DoH) of plain lime and zeolite binder in the extension of time

The simulated evolution of DoH is shown in Figure 2 and it can be seen as XRD analysis in Figure 3 also confirms that phases such as C<sub>3</sub>A, C<sub>3</sub>S (3CaO.SiO<sub>2</sub>) and C<sub>4</sub>AF were not even in the range of detection and did not influence the pace of hydration of zeolite and lime. Considering the fact that zeolite hydration occurs at early ages of curing, as shown in Figure 2, it only continues to develop up to roughly 10 days but after that it does not last longer and contributes to the final strength as a constant factor and the overall performance of stabilized soil will only lean on pozzolanic reactions.

As already mentioned, simulated hydration process in Figure 2 was confirmed by an XRD analysis of mixture containing zeolite and lime at early ages of setting. The result of X-ray analysis serves simultaneously as chemical identification (compare to recognized patterns) of the reaction products by

measuring the mass dimension of different elements participating in the process in the scanned array; while confirming the presence of dehydrated zeolite (clinoptilolite) content. This is the way that hydration process and its pozzolanic products (C-S-H) were identified as well as the hydrated lime particles (portlandite) of the stabilized soil.

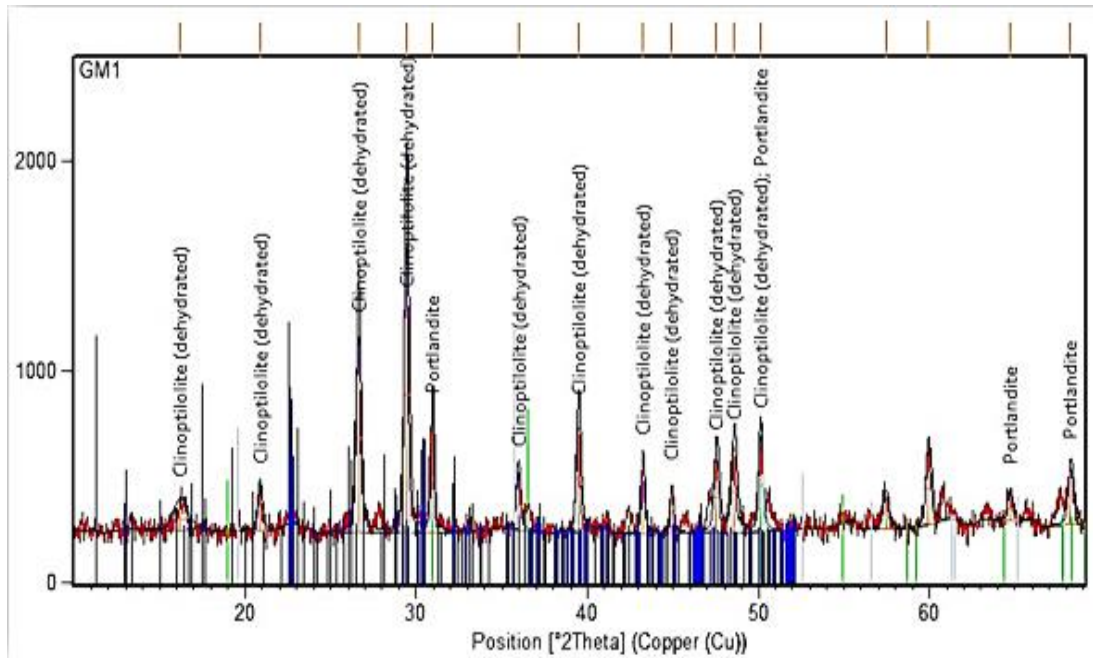


Figure 3. X-ray diffraction analysis of samples containing zeolite and lime

It should be emphasized that, appropriate mixing in the laboratory causes less infiltration of air voids into mixture while later on during filed compaction or backfilling, insufficient compaction of mixed soil will lead to appearance of large pores especially after consumption of free water in the soil during hydration and also due to surface evaporation. Consequently, any simulated modeling confirmed by experimental results before employment in practice still should be accompanied by in field test subjects.

**Specific Gravity Variations**

The values of specific gravity of dry mixed samples by instrumentation of pycnometer procedure are summarized in table 4. It can be seen in Table 4 that in samples without zeolite as lime content increased specific gravity was also increased, but there is no such a trend in samples containing zeolite. Meanwhile, in sample with a constant lime content as zeolite content increased specific gravity is also increased which is expected to be due to more absorbed volume of water to the charged surface of zeolite.

Table 4. Variations of specific gravity of solid particle ( $G_s$ ) With variation of lime and zeolite content

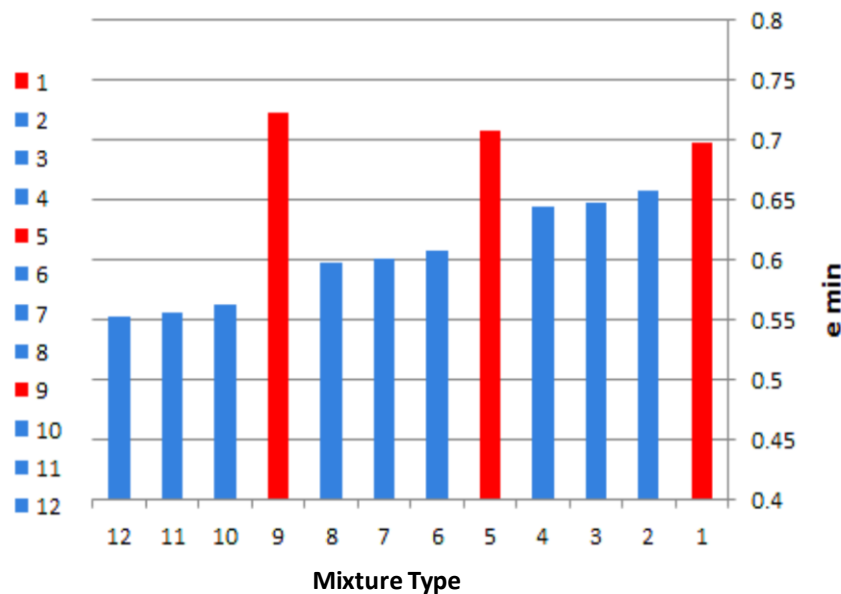
| Zeolite content | 3% Lime | 4% Lime | 5% Lime |
|-----------------|---------|---------|---------|
| 0% zeolite      | 2.84    | 2.85    | 2.86    |
| 8% zeolite      | 2.832   | 2.793   | 2.72    |
| 10% zeolite     | 2.844   | 2.813   | 2.733   |
| 12% zeolite     | 2.861   | 2.822   | 2.752   |

### Index Density Dependent Void Ratios

The minimum index density represents the loosest condition of a granular soil which prevents dispersion and minimizes particle segregation. Any particular procedure opted to determine the relative density for a given compaction procedure should comprise determining the minimum and maximum void ratios correspond to the states when soil is absolutely cohesionless with no considerable strength. Also, when soil is properly compacted with acceptable bearing capacity in such a condition that prevents particle segregation and minimizes compaction efforts of the soil, its state is definable as maximum index density. According to ASTM D 4254 maximum and minimum-index void ratios can be calculated by substituting maximum and minimum (loose state) index dry densities in the following equation:

$$e = \frac{\gamma_w \times G_s}{\gamma_d} - 1 \quad (2)$$

where  $e$  is driven void ratio by substituting equivalent index dry densities,  $\gamma_d$  is maximum or minimum dry density of the specimen and  $\gamma_w$  is density of water at 20°C and  $G_s$  is specific gravity of soil. Incorporating the data provided in Figure 2 and Table 4 enables equation 2 to compute maximum and minimum void ratios in accordance with minimum and maximum dry densities as shown in Figure 4.



**Figure 4.** Variations of maximum index void ratios for each mixture of tested specimens

Figure 4, depicts the variation of minimum index void ratio of each mixture after specified terminology in Table 2. Accordingly, as can be seen in figure 4, In samples without zeolite (red columns) with the increase of lime content, minimum index void ratio is increasing and this trend only is prevailing in samples without zeolite. The reason for such a behavior is that adding lime separately without an adequate pozzolan in the mixture in the presence of water leads to flocculation of lime particles adjacent to water without proper adhering bonds and this consequently will influence the gradation and particle size distribution of parent soil. Whereas, lime in conjunction with zeolite shows promising performance as long as zeolite content is increasing minimum index void ratio decreases (blue columns) which it then leads to a higher maximum dry density while required moisture content for a better compaction is reduced because of concurrent less heat of hydration of zeolite and its subsequent constant rate of influence in extension of curing periods.

The results of maximum index void ratios of each mixture after specified terminology in Table 2 are shown in Figure 5, as it is demonstrated in Figure 5 in samples containing only lime with the increase of lime content, maximum index void ratio increases and minimum dry density decreases. But as the amount of zeolite content increases while lime content was kept constant, maximum index void ratio decreases and minimum dry density increases. The reason for this behavior is that without mature pozzolanic reactions and during early ages of mixing when the hydration process is predominantly undergone (Figure 2) zeolite particles do not participate in reactions as pozzolanic reactions are mainly time dependent reactions and they require a certain period of curing or setting time. Instead, zeolite acts as a fine filler and fills the void spaces among larger size aggregates during the early stages of backfilling and contributes to the artificial cementation due to pozzolanic reactions which occur in the following days of setting.

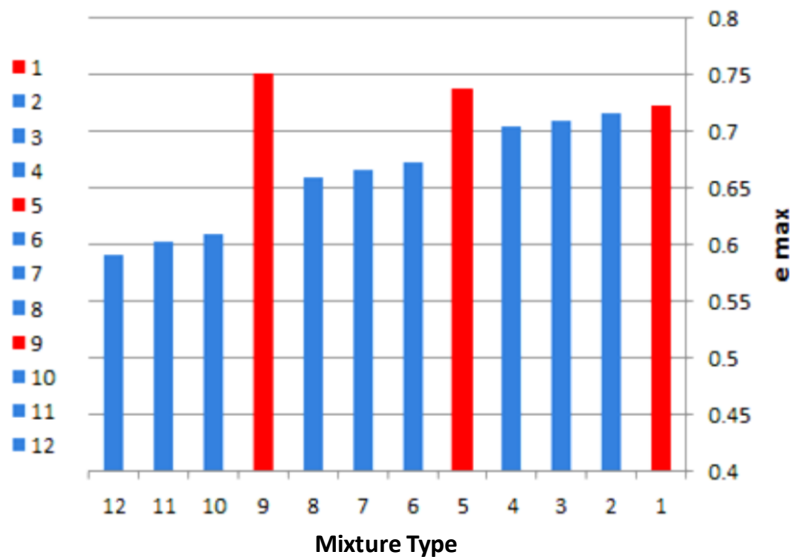


Figure 5. Variations of maximum index void ratios for each type of mixture of tested specimens

## CONCLUSIONS

Addition of zeolite combined with lime to the engineering fills comprising of fine sands provides a unique means of modifying poorly graded soils' grain size distribution by providing fine filler content, while zeolite as a natural pozzolan in conjunction with calcium hydroxide has the ability to induce artificial cementation too. In reference to the results obtained in this study, the following conclusions can be made on zeolite-lime stabilized fine sands:

1. Increase of zeolite content while lime content was kept constant led to increase by specific gravity of soil's solid and consequently during proctor compaction, maximum dry density of each mixture increased. But with the increase of lime percentage, while zeolite content was kept constant, specific gravity of soil's solid related to each mixture decreased. Which this is due to absorption of free water and subsequent flocculation of lime particles and creation of larger pores in the extent of mixing procedure and also setting period.

2. Simulation of hydration process indicated that at early stages of interaction between zeolite and lime particles, pozzolanic reaction was prevailed considerably by hydration of calcium hydroxide with alkali exchanged clinoptilolite and preliminary product of hydration is presence of new phases such as carbolaluminat hydrate groups.

3. When lime content was kept content while zeolite content increased, compacted soil showed higher maximum dry density while required compaction water decreased. In other words, zeolite has

the most influence deciding the compaction performance where addition of more zeolite is equal to a better compaction effort.

4. Result obtained in this study have shown that appropriate percentage of zeolite content is fixated at 12 percent and optimum lime content is 5 percent. Furthermore, with the increase of zeolite and lime content, maximum index void ratio decreased while minimum dry density decreased. Additionally, maximum dry density increases in result of reduction of minimum index void ratio.

5. In addition, Increase of lime content in mixtures containing lime only led to decrease of maximum dry density following by an increase in maximum and minimum index void ratios. The reason lies in flocculation of lime particles in contact with water which this then will create large pore voids. Results demonstrated that samples containing lime without zeolite showed higher maximum dry density while being mixed with 3 percent of lime.

## ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to thank Dr. M.S Pakbaz for his valuable comments and A.N.S. consulting engineers for providing testing equipment.

## REFERENCES

- Ahmadi, B., &Shekarchi, M. (2010). Use of natural Zeolite as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 134-141.
- da Silva, W. R. L., Šmilauer, V., &Štemberk, P. (2015). Upscaling semi-adiabatic measurements for simulating temperature evolution of mass concrete structures. *Materials and Structures*, 48(4), 1031-1041.
- Jamhiri, B., &Parsaeimaram, M. (2019). Study on Integrated Liquefaction Hazard Mapping Developed by SPT, CPT, Downhole and LPI Index. *Geological Behavior (GBR)*, 3(2), 6-14.
- Jamhiri, B., Ebrahimi Fahadani, A., X, Yongfu. (2020). Investigating uncertainties in the source-site and the model-input within reliability-based deterministic and probabilistic liquefaction initiation analyses. *Disaster Advances*, 13(2), 55-62.
- Jendele, L., Šmilauer, V., &Červenka, J. (2014). Multiscale hydro-thermo-mechanical model for early-age and mature concrete structures. *Advances in Engineering Software*, 72, 134-146.
- Karakurt, C., &Topçu, İ. B. (2011). Effect of blended cements produced with natural Zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1789-1795.
- Krolo, P. E. T. A. R., Krstulovic, R., Dabic, P., &Bubic, A. (2005). Hydration and leaching of the cement-zeolite composite. *Ceramics- Silikaty*, 49(3), 213-219.
- Mertens, G., Snellings, R., Van Balen, K., Bicer-Simsir, B., Verlooy, P., &Elsen, J. (2009). Pozzolanic reactions of common natural Zeolites with lime and parameters affecting their reactivity. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 233-240.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., &Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing Zeolite as a highly reactive natural Pozzolan. *Construction and Building Materials*, 35, 1023-1033.
- Snellings, R., Mertens, G., Cizer, Ö., &Elsen, J. (2010). Early age hydration and pozzolanic reaction in natural zeolite blended cements: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction. *Cement and Concrete Research*, 40(12), 1704-1713
- Snellings, R., Mertens, G., Hertsens, S., &Elsen, J. (2009). The Zeolite-lime Pozzolanic reaction: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder diffraction. *Microporous and mesoporous Materials*, 126(1), 40-49.

Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., & Khani, S. (2013). Comparing a natural Pozzolan, Zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 41, 879-888.

Varela, M. B., Ramírez, S. M., Ereña, I., Gener, M., & Carmona, P. (2006). Characterization and Pozzolanicity of zeolitic rocks from two Cuban deposits. *Applied Clay Science*, 33(2), 149-159.

Vogiatzis, D., Kantiranis, N., Filippidis, A., Tzamos, E., & Sikalidis, C. (2012). Hellenic Natural Zeolite as a replacement of sand in mortar: Mineralogy monitoring and evaluation of its influence on mechanical properties. *Geosciences*, 2(4), 298-307.





## AN ANALYTICAL INVESTIGATION OF A BUILDING HAVING SOFT STOREY IRREGULARITY STRENGTHENED WITH CONCENTRICALLY STEEL BRACES

<sup>1</sup>Alptuğ ÜNAL

<sup>1</sup>Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering,  
Konya, TURKEY

<sup>1</sup>[aunal@ktun.edu.tr](mailto:aunal@ktun.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.04.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.06.2019)

**ABSTRACT:** When buildings that were damaged and destroyed in major earthquakes in previous years are examined, it is seen that these buildings have several structural defects. One of these defects is that soft storey irregularity is not predicted in reinforced concrete buildings. For this reason, many buildings collapsed because of the major earthquakes, resulting in loss of life and property. Buildings stocks in earthquake zones must be inspected and buildings with the soft storey irregularity must be strengthened immediately. Also, strengthening methods are required to be quick and effective, and aesthetics of structures should not be disturbed. In this study, a 10-storey building with the soft storey irregularity is discussed. The building is strengthened with five different types of Steel Braces in various earthquake regulations in the world. The strengthening was conducted with a nonlinear analysis program and results were evaluated. According to the results, it was found that the Concentrically Steel Braces significantly increased the stiffness of the reinforced concrete building and eliminated the soft storey irregularity.

**Key Words:** Soft Storey, Concentrically Steel Braces, strengthening, reinforced concrete building, earthquake.

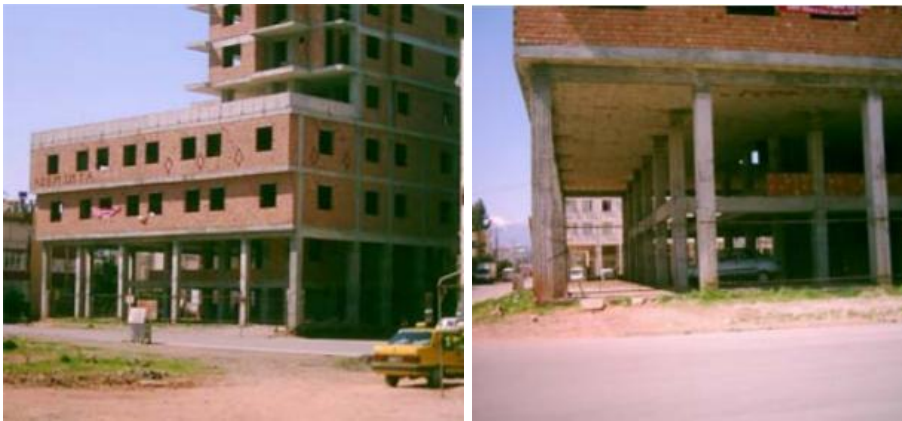
### Yumuşak Kat Düzensizliği Bulunan Bir Binanın Merkezi Çelik Çaprazlar ile Güçlendirilmesinin Analitik Olarak İncelenmesi

**ÖZ:** Son yıllarda meydana gelen büyük depremlerde hasar gören ve yıkılan binalar incelendiğinde bu binaların çeşitli yapı kusurları olduğu görülmüştür. Bu kusurlardan bir tanesi de yumuşak kat düzensizliğinin betonarme binalarda öngörülmemiş olmasıdır. Bu sebeple birçok bina, büyük depremler sonucu yıkılmış ve can ve mal kaybı meydana gelmiştir. Deprem bölgelerindeki yapı stoğunun bir an önce incelenmesi ve yumuşak kat düzensizliği bulunan binaların bir an önce güçlendirilmesi gerekmektedir. Yapılacak olan güçlendirme yöntemlerinin hızlı ve etkili olmasının yanında yapının estetiğinin bozulmaması gerekmektedir. Yapılan bu çalışmada yumuşak kat düzensizliği bulunan 10 katlı bir bina ele alınmıştır. Bu bina Dünyadaki çeşitli deprem yönetmeliklerinde bulunan 5 farklı Merkezi Çelik Çapraz çeşidi ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işlemi bir non-lineer analiz programı ile yapılmış olup, sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Merkezi Çelik Çaprazların betonarme binanın rijitliğini önemli ölçüde arttırdığı ve yumuşak kat düzensizliğini ortadan kaldırdığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yumuşak kat, Merkezi Çelik Çaprazlar, güçlendirme, betonarme bina, deprem.

## INTRODUCTION

Because of major earthquakes that have occurred in recent years, many lives and property losses have taken place. It has been ascertained that most of damaged and destroyed buildings do not comply with norms stated in regulations. When building stocks in Turkey and in the world are examined, it is seen that the ground floors of many buildings are designed as workplaces. For this reason, no or very few walls were used on the ground floors of the buildings compared to the upper floors. It is, by implication, observed that the upper floors of the buildings designed in this way are very rigid compared to the ground floor, leading to the formation of the Soft Storey Irregularity (Figure 1).



**Figure 1.** Examples of short storey irregularity (Korkmaz and Ucar, 2006)

The formation of the “Soft Storey”, which is stated in the world’s prominent earthquake regulations, is usually caused by the decrease in the stiffness of the ground floors. Plastic transfigurations at the lower and upper ends of the columns lead to a dangerous lateral displacement mechanism along with a large amount of elastic transfrontier transfiguration at the column ends, and collapse is frequently inevitable (TEC2007, 2007; TEC2018, 2018).

Buildings with soft storey irregularity should be detected and strengthened against the earthquake immediately. There are many strengthening methods in the literature to prevent soft storey irregularity (Oinam and Sahoo, 2019; Thinley and Hao, 2017; Benavent-Climent and Mota-Paez, 2017; Shin et al., 2016; Sahoo and Rai, 2013). In these strengthening methods, however, the buildings must be completely evacuated. In addition, the aesthetics of the building deteriorate in the suggested strengthening methods. Therefore, it is necessary to propose strengthening methods without in need of evacuation of building and disturbing aesthetics.

Concentrically Steel Braces (CSB) are utilized in order to meet the lateral load in steel buildings in the earthquake regulations. Although CSBs are not usually used in reinforced concrete buildings, it is still utilized in some cases as strengthening elements (Ju et al., 2014; Lee, 2015; Mowrtage, 2013; Unal and Kaltakci, 2016; Varum et al., 2013; Ebadi et al., 2018; Javadi and Yamakawa, 2019; Liu et al., 2019; Mashhadiali and Kheyroddin, 2018; Mazza et al., 2018; Oinam and Sahoo, 2018).

In this study, a building of 10 floors, with Soft Storey irregularity is based as a reference. Five different CSB applications were applied to the ground floor of the building. Strengthening was carried out by a non-linear analysis program and the results were evaluated. In lights of the results, it was found out that the Concentrically Steel Braces substantially increased the stiffness of the reinforced concrete building and eliminated the soft storey irregularity.

In this study, CSBs were used to eliminate the soft storey irregularity of the reinforced concrete building. The use of CBSs as strengthening elements in reinforced concrete is not well investigated. However, the use of CSBs as a strengthening element is thought to have many advantages. In this study, CBSs are preferred due to their practical application together with lightweight, aesthetical properties.

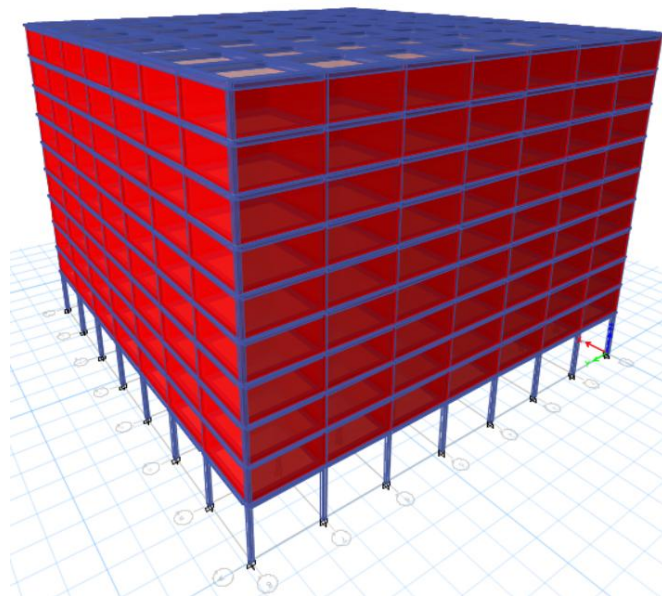
Moreover, evacuation of building may not be obligatory compared to other conventional strengthening methods (Figure 2).



**Figure 2.** Steel brace applications (Yon and Sayin, 2011)

## MATERIAL AND METHOD

The aim in study is to strengthen a building with soft storey irregularity using CSB. For this purpose, a 10-storey reinforced concrete building was approached. The building was dealt with the help of a non-linear analysis program (ETABS17, 2018). The ground floor has no walls as it was designed as a workplace. In addition, in order to represent other available buildings, the ground floor height was considered as 5 m and the height of other floors was taken as 3 m. The building is symmetrical in X and Y directions and eight axes are designed to have seven openings. The distance between the axes of the building is designed 6 m intervals and the base-column joint area is defined as a fixed-support (Figure 3).



**Figure 3.** 3D view of the referenced building

The building is considered to be located in Central Düzce (Figure 4). For this reason, acceleration records were determined by selecting Central Düzce from the Disaster and Emergency Management

Centre (DEMC) Earthquake Zones Map (DEMC, 2019). Assuming that the building is on a bad ground, it was chosen ZE ground class according to TEC2018. It is assumed that the building is used as a residence and the ground floor is a workplace. Based on the location of the building and the ground class, output from the DEMC (DEMC, 2019) official website is as follows (Table 1):

**Table 1.** Outputs for earthquake ground motion levels

| Definition   | DD2    | DD3    |
|--|--------|--------|
| S <sub>s</sub> : Short term map spectral acceleration coefficient  | 1.318  | 0.449  |
| S <sub>1</sub> : Map spectral acceleration coefficient for 1.0-second period                                     | 0.358  | 0.121  |
| S <sub>DS</sub> : Short term design spectral acceleration coefficient  | 1.150  | 0.827  |
| S <sub>DI</sub> : Design spectral acceleration coefficient for 1.0-second period                                 | 0.919  | 0.485  |
| PGA: Maximum ground acceleration [g]   | 0.542  | 0.193  |
| PGV: Maximum ground speed [cm/sec]   | 34.410 | 12.041 |
| T <sub>A</sub> : Lateral elastic design acceleration spectrum corner period (s)                                  | 0.160  | 0.117  |
| T <sub>B</sub> : Lateral elastic design acceleration spectrum corner period (s)                                  | 0.799  | 0.587  |
| T <sub>L</sub> : Period of transition to constant displacement zone in lateral elastic design spectrum (s)       | 6.000  | 6.000  |
| T <sub>AD</sub> : Vertical elastic design acceleration spectrum corner period (s)                                | 0.053  | 0.039  |
| T <sub>BD</sub> : Vertical elastic design acceleration spectrum corner period (s)                                | 0.266  | 0.196  |
| T <sub>LD</sub> : Period of transition to constant displacement zone in the vertical elastic design spectrum (s) | 3.000  | 3.000  |

\* DD-3 (earthquake ground-motion level, probability of exceedance of which is 50% in 50 years), DD-2 (earthquake ground-motion level, probability of exceedance of which is 10% in 50 years)



**Figure 4.** Location of the building in question

The columns are 30x30 cm and the beams are designed as 25x50 cm. 8 $\phi$ 14 longitudinal reinforcement,  $\phi$ 8/30 transverse reinforcement were used in the columns. In the beams, 3 $\phi$ 12 tension reinforcement, 2 $\phi$ 12 montage reinforcement and  $\phi$ 8/30 transverse reinforcement were used. All slabs in the reinforced concrete building were formed with a thickness of 120 mm. In the CSBs used for strengthening, the outer diameter of the pipe section is 300 mm and the pipe thickness was chosen as 50 mm. The cross-sections of the reinforced concrete elements and the sections of the CSBs are shown in Figure 5. CSBs used as strengthening elements in reinforced concrete buildings are shown in Table 2 (TEC2007, 2007; TEC2018, 2018).

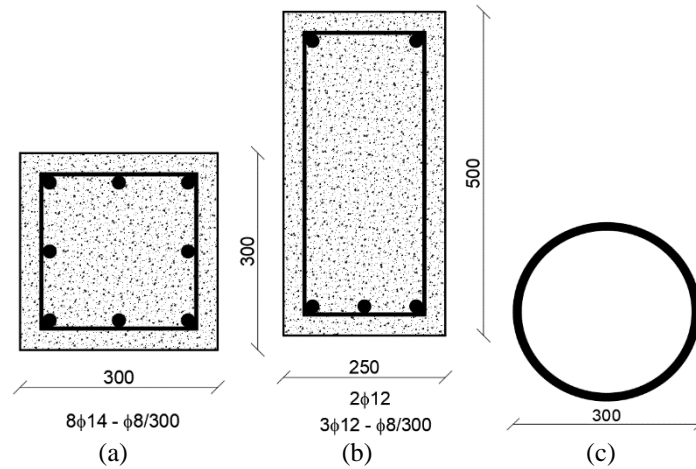


Figure 5. Sections (a) columns (b) beams (c) braces

Table 2. CSBs used as strengthening elements

|   | R | V | Λ | / | \ | X |
|---|---|---|---|---|---|---|
| CSBs configurations for strengthening purpose |   |   |   |   |   |   |

\* R: Reference Building, V: Strengthened With V Braces, Λ: Strengthened With Inverse V Braces(Λ), /: Strengthened With / Braces, \: Strengthened With Inverse / Braces (\), X: Strengthened With X Braces

Concrete class is C20 ( $f_{ck} = 20$  MPa) in the reinforced concrete building and S420 ( $f_y = 420$  MPa,  $f_u = 500$  MPa) in reinforcement class. In the bracings used for strengthening, pipe profiles used in industry were taken as examples. Steel class of S355 ( $E = 210.000$  MPa,  $f_y = 355$  MPa,  $f_u = 510$  MPa) were used in CSBs. CSBs are designed as “Moment Transferring Braces” as stated in the regulations. Hence, since the connection points of the braces are intended to be fully interactive to the frame, no hinge definition is considered. Similarly, no hinge is defined in other reinforced concrete structural system elements.

The dead load on the floors in the reinforced concrete building was  $G = 1.5$  kN / m<sup>2</sup> and the live load was taken as  $Q = 5$  kN / m<sup>2</sup>. The weight of the walls on the beams was calculated as 15 kN/m, the modulus of elasticity was  $E = 3600$  MPa, the pressure strength was 8 MPa while the wall thickness was 200 mm.

The reinforced concrete building, having soft storey irregularity, was investigated by a non-linear analysis program (ETABS17, 2018). After defining material and section characteristics to the analysis program, building model was formed. Later, loads to affect the building were identified and these loads were put in the program. The referenced building and all the strengthened buildings were analyzed by three different methods and the differences between these methods were examined.

Equivalent Seismic Load Method (EL), Mode Superposition Method (MS) and Time History Analysis Method (TH) indicated in TEC2018 (TEC2018, 2018) were taken benefit for the buildings and the analysis was made accordingly. In general, the EL method is more common for designing low-rise structures while MS method is more widely used in all type of structures. In TH method, the acceleration records of the earthquake occurring in the area where the building is located are used. For EL and MS, Z4 local site class, building importance factor 1 and earthquake zone 1 were chosen. For TH analysis, as seen in Figure 6, Düzce earthquake acceleration records are used.

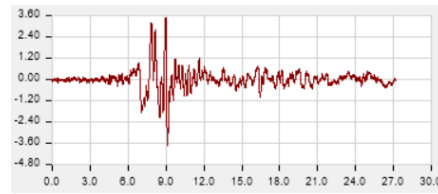


Figure 6. Düzce earthquake acceleration record

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, a strengthening method is exhibited in the buildings with Soft Storey irregularity. For this, a non-linear analysis program has been used to evaluate the results by strengthening the referenced building.

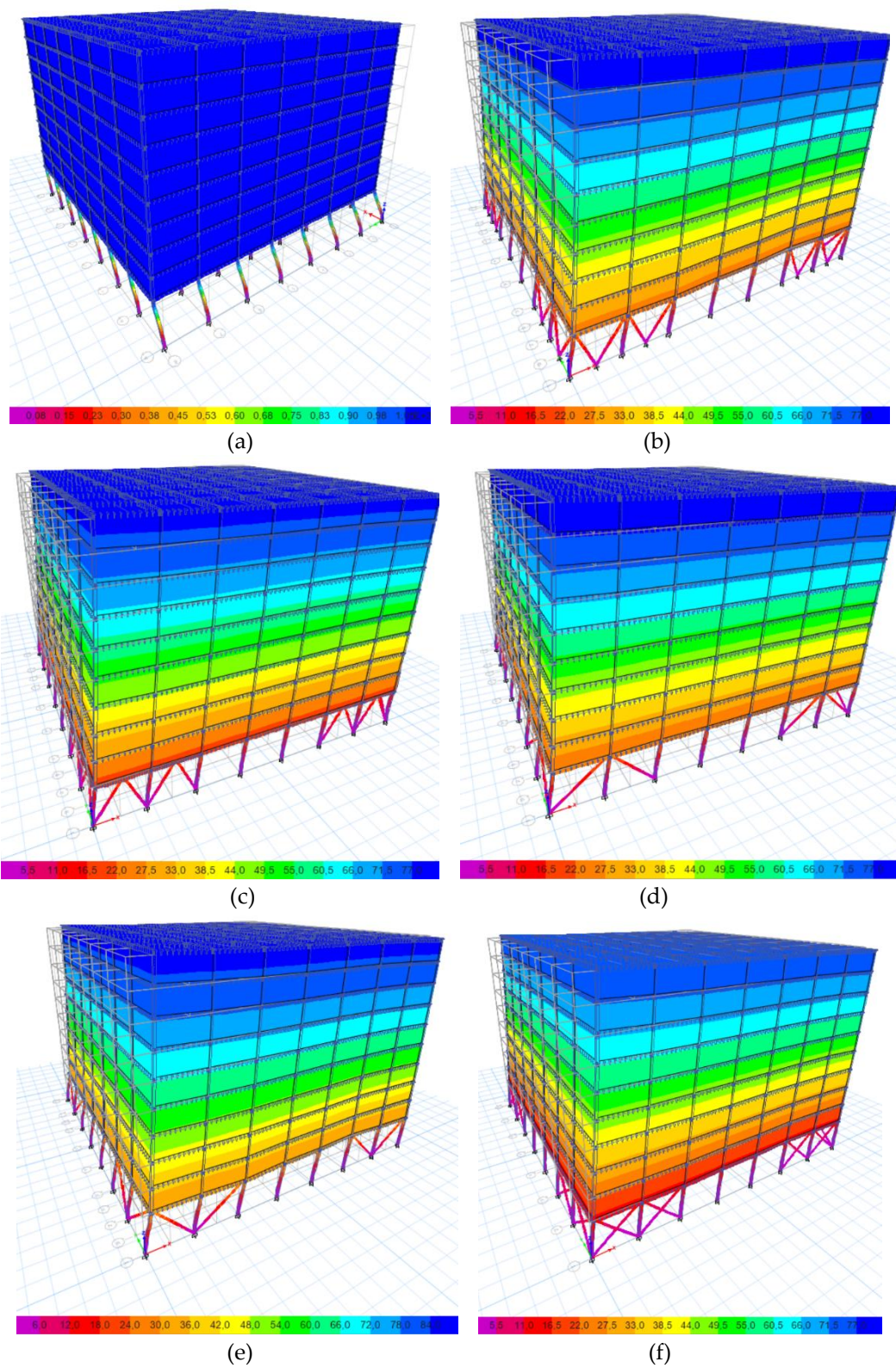
During examination of the result analyses, the stress conditions occurring in the building were examined. For this purpose, the stress levels obtained from the non-linear analysis program are given in Figure 7. As seen in Figure 7, because R building does not have strengthening elements, only the ground floor is damaged, indicating that the ground floor column ends will be hinged under a quake load and the collapse will be because of that. Such a collapse will be sudden and brittle. In buildings strengthened with CSB, the stress distribution did not occur only on the ground floor column ends, and the stress transmission was transferred to the entire building, which signalizes that Soft Storey irregularity was substantially prevented. It can be said that in buildings strengthened with CSB; V, Λ and X buildings made a better stress transmission compared to the buildings / and \ buildings.

As buildings are strengthened, major increases occur in building weight, which also causes an increase in the earthquake load to be met by the building. Since CSBs are lighter than the materials used in other strengthening methods, the increase in earthquake load is not very high. For this purpose, base shear forces of the buildings were examined in Table 3. As can be seen from the table, base shear forces affecting the building increase with the same proportion as the weight of the building.

Table 3. Base shear forces

| Building Type | EL (kN) | MS (kN) | TH (kN) |
|---------------|---------|---------|---------|
| R             | 62.119  | 37.628  | 6.169   |
| V             | 117.787 | 110.875 | 70.234  |
| Λ             | 121.616 | 111.607 | 73.040  |
| /             | 118.222 | 110.283 | 70.694  |
| \             | 110.285 | 105.137 | 63.661  |
| X             | 127.201 | 113.090 | 77.924  |

In order to observe the increase of building stiffness after strengthening, natural vibration periods of the buildings should be determined. The natural vibration period of the building must be low in order to prevent soft storey irregularity. Table 4 shows the natural vibration periods of all buildings. As seen from the table, natural vibration periods have decreased by six times after the R building has been strengthened. The X building exhibits a more rigid behaviour than other strengthening methods do.



**Figure 7.** Stress levels of the buildings (a) R (b) V (c)  $\Lambda$  (d) / (e) \ (f) X

**Table 4.** Natural vibration periods

|                                    | R      | V     | Λ     | /     | \     | X     |
|------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Natural Vibration Periods<br>(sec) | 10,552 | 1,682 | 1,616 | 1,674 | 1,826 | 1,528 |

In this study, since there is no strengthening in R building, and the first floor has over-displacement, the stresses in the building are concentrated on this floor, which will lead the collapse of the building. It is aimed to prevent this extreme displacement on the first floor with the proposed strengthening method. For that, the analysis results were examined and displacements on the 1<sup>st</sup> and 10<sup>th</sup> storeys were determined for all buildings. Table 5 shows the displacements that occur for all loads on each storey of the buildings. As can be seen from the table, although the first storey in the building R has extreme displacement, the displacement on the first storey in other buildings is largely limited.

**Table 5.** Displacement Results

| Building Type | 1 <sup>st</sup> Storey |            |            | 10 <sup>th</sup> Storey |            |            |
|---------------|------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|
|               | EL<br>(mm)             | MS<br>(mm) | TH<br>(mm) | EL<br>(mm)              | MS<br>(mm) | TH<br>(mm) |
| R             | 1.124,80               | 676,3      | 81,40      | 1.091,40                | 661,00     | 79,50      |
| V             | 25,27                  | 23,71      | 14,81      | 80,23                   | 68,62      | 37,00      |
| Λ             | 20,14                  | 18,48      | 12,00      | 79,36                   | 66,54      | 37,92      |
| /             | 23,48                  | 21,90      | 13,91      | 81,20                   | 68,95      | 37,36      |
| \             | 31,07                  | 29,44      | 17,51      | 86,59                   | 74,96      | 42,37      |
| X             | 15,26                  | 13,51      | 8,69       | 76,15                   | 62,38      | 40,00      |

The major problem in buildings with soft storey irregularity is the “Relative Storey Drifts” between two storeys. “Relative Storey Drift Limitations” indicated in TEC2007 and TEC2018 must be applied to the whole building. For this reason, relative storey drifts are checked in the analysis. Relative storey drifts are examined in table 6 via EY method and MS method in table 7. Because TH displacements were very small, it was considered that a healthy evaluation could not be carried out and the relative storey drift control was not performed for the TH method. As it can be seen from Table 6 and Table 7, although there is a large relative drift on the first storey in the R building, the relative drift in the strengthened buildings has small values, which shows us that the suggested strengthening method is appropriate and usable.

In TEC2007, equation 1 was used to limit the relative drifts, but in TEC2018, equation 2 was introduced. In this study, two earthquake regulations were compared in terms of the relative storey drifts.  $\lambda$  coefficient in the equation 2 is the ratio of the elastic design spectral acceleration of the DD-3 earthquake ground motion to the elastic design spectral acceleration of DD-2 motion for the dominant vibration period in line with predicted earthquake.  $\kappa$  coefficient is considered as  $\kappa=1$  in reinforced concrete buildings. In equation 2,  $\lambda$  coefficient was calculated as  $\lambda=1.8948$ . Depending on  $\lambda$  and  $\kappa$  values available in TEC2018,  $\delta_{i,max}/h_i$  value must be lower than 0.00422. As for TEC2007, this value should be smaller than 0,02. When Table 6 and Table 7 are examined, it appears that it cannot be possible to provide Relative Storey Drift limitation conditions in both two-earthquake regulations in R building. In all the buildings strengthened, although Relative Storey Drift limitations are provided in accordance with TEC2007, in TEC2018 only buildings strengthened with  $\Lambda$  and X braces, limitations are realized, which reveals that TEC2018 is rather safer than TEC2007.

$$\frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0.02$$

(Equation 1)



$$\lambda \frac{\delta_{i,max}}{h_i} \leq 0.008\kappa \quad (\text{Equation 2})$$

**Table 6.** Relative storey drifts for EL method

| Storey No | R        | V        | Λ        | /        | \        | X        |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10        | 0,00071  | 0,001121 | 0,001255 | 0,001223 | 0,001186 | 0,001269 |
| 9         | 0,000882 | 0,001448 | 0,001591 | 0,001551 | 0,001492 | 0,001621 |
| 8         | 0,001036 | 0,00174  | 0,001892 | 0,001843 | 0,001767 | 0,001937 |
| 7         | 0,001168 | 0,001989 | 0,002149 | 0,002093 | 0,002004 | 0,002206 |
| 6         | 0,001277 | 0,002194 | 0,002358 | 0,002297 | 0,002199 | 0,002427 |
| 5         | 0,001359 | 0,00235  | 0,002518 | 0,002453 | 0,002352 | 0,002596 |
| 4         | 0,001432 | 0,002457 | 0,002626 | 0,002559 | 0,002458 | 0,002711 |
| 3         | 0,001372 | 0,002509 | 0,002678 | 0,00261  | 0,002516 | 0,002769 |
| 2         | 0,001898 | 0,00251  | 0,002672 | 0,002609 | 0,002532 | 0,002764 |
| 1         | 0,218287 | 0,005055 | 0,004029 | 0,004697 | 0,006214 | 0,003051 |

**Table 7.** Relative storey drifts for MS method

| Storey No | R        | V        | Λ        | /        | \        | X        |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10        | 0,000261 | 0,000788 | 0,0009   | 0,000877 | 0,000848 | 0,000903 |
| 9         | 0,000334 | 0,001089 | 0,001215 | 0,001181 | 0,001127 | 0,001233 |
| 8         | 0,000408 | 0,001365 | 0,0015   | 0,001459 | 0,001387 | 0,001529 |
| 7         | 0,000481 | 0,001607 | 0,001745 | 0,001699 | 0,001617 | 0,001779 |
| 6         | 0,000551 | 0,001813 | 0,001949 | 0,001902 | 0,001816 | 0,001987 |
| 5         | 0,000617 | 0,001983 | 0,002113 | 0,002067 | 0,001984 | 0,002152 |
| 4         | 0,000690 | 0,002118 | 0,002238 | 0,002195 | 0,002122 | 0,002277 |
| 3         | 0,00694  | 0,002216 | 0,002324 | 0,002286 | 0,002228 | 0,002361 |
| 2         | 0,001064 | 0,002278 | 0,002368 | 0,002339 | 0,002308 | 0,002398 |
| 1         | 0,132203 | 0,004742 | 0,003697 | 0,004381 | 0,005889 | 0,002702 |

$\eta_{ki}$  coefficient obtained through Equation 3 must be less than 2 in order not to have a soft storey irregularity according to TEC2007 and TEC2018. For this reason,  $\eta_{ki}$  coefficients of EL and MS methods are calculated and given in Table 8 and Table 9. As can be seen from the tables,  $\Lambda$ , / and X braces avert soft storey formations. V brace is, on the other hand, is approximately the limit value.

$$\eta_{ki} = \left(\frac{\Delta_i}{h_i}\right)_{ort} / \left(\frac{\Delta_{i-1}}{h_{i-1}}\right)_{ort} > 2 \quad (\text{Equation 3})$$

**Table 8.** Soft storey irregularity control for EL method

| Storey No | R          | V        | $\Lambda$ | /        | \        | X        |
|-----------|------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 10        | 0,00071    | 0,001121 | 0,001255  | 0,001223 | 0,001186 | 0,001269 |
| 9         | 1,24225352 | 1,291704 | 1,267729  | 1,268193 | 1,25801  | 1,277384 |
| 8         | 1,17460317 | 1,201657 | 1,189189  | 1,188266 | 1,184316 | 1,194941 |
| 7         | 1,12741313 | 1,143103 | 1,135835  | 1,135648 | 1,134126 | 1,138875 |
| 6         | 1,09332192 | 1,103067 | 1,097255  | 1,097468 | 1,097305 | 1,100181 |
| 5         | 1,064213   | 1,071103 | 1,067854  | 1,067915 | 1,069577 | 1,069633 |
| 4         | 1,05371597 | 1,045532 | 1,042891  | 1,043212 | 1,045068 | 1,044299 |
| 3         | 0,95810056 | 1,021164 | 1,019802  | 1,01993  | 1,023596 | 1,021394 |
| 2         | 1,38338192 | 1,000399 | 0,99776   | 0,999617 | 1,006359 | 0,998194 |
| 1         | 115,008957 | 2,013944 | 1,507859  | 1,800307 | 2,454186 | 1,103835 |

**Table 9.** Soft storey irregularity control for MS method

| Storey No | R          | V        | $\Lambda$ | /        | \        | X        |
|-----------|------------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| 10        | 0,000261   | 0,000788 | 0,0009    | 0,000877 | 0,000848 | 0,000903 |
| 9         | 1,27969349 | 1,38198  | 1,35      | 1,346636 | 1,329009 | 1,365449 |
| 8         | 1,22155689 | 1,253444 | 1,234568  | 1,235394 | 1,230701 | 1,240065 |
| 7         | 1,17892157 | 1,177289 | 1,163333  | 1,164496 | 1,165826 | 1,163506 |
| 6         | 1,14553015 | 1,128189 | 1,116905  | 1,119482 | 1,123067 | 1,11692  |
| 5         | 1,11978221 | 1,093767 | 1,084146  | 1,086751 | 1,092511 | 1,08304  |
| 4         | 1,11831442 | 1,068079 | 1,059158  | 1,061925 | 1,069556 | 1,058086 |
| 3         | 1,0057971  | 1,04627  | 1,038427  | 1,041458 | 1,049953 | 1,036891 |
| 2         | 0,15331412 | 1,027978 | 1,018933  | 1,023185 | 1,035907 | 1,015671 |
| 1         | 124,25094  | 2,081651 | 1,561233  | 1,873023 | 2,55156  | 1,126772 |

In the light of all these evaluations, it is seen that X braces are more effective than V braces although the same amount of material is used. Likewise, / braces are more effective than \ braces although the same amount of material is used.

When all these results are viewed, the idea that the buildings with soft storey irregularity can be strengthened with CSBs is formed. In CSBs, the most effective braces, offsetting the soft storey irregularity, are  $\Lambda$  and X. Although other brace types are also effective, efficiency of  $\Lambda$  and X braces is quite a lot compared to the others.

In this study, it was found that CSBs can be used for strengthening the buildings with soft storey irregularity. It is also possible to use CSBs as a strengthening element in cases where the lateral stiffness of buildings should be increased.

## CONCLUSIONS

In this study, it is aimed to eliminate soft storey irregularity of a building by strengthening with CSBs. In this context, a 10-storey building with no walls on the ground floor but has walls on the upper floors has been discussed. In order to strengthen the building, it has been strengthened by using a computer program, which makes non-linear solution by using CSBs in different configurations on the ground floor. Analysis results were examined and conclusions were interpreted.

The natural vibration periods of the strengthened buildings are considerably lower than the non-strengthened building, which accordingly means that the strengthened buildings are more rigid and has fewer displacements. Similarly, when the displacements and relative storey drifts on the storeys were examined, it was seen that there was an excessive displacement on the ground storey in the non-

strengthened building. This was prevented in the building strengthened with CSB. Examining relative storey drifts, it was concluded that TEC2018 is quite safe compared to TEC2007. After viewing analysis results of the strengthened buildings, it was seen that X and  $\Lambda$  braces were more effective than V, / and \. This strengthening method does not require complete evacuation of the building. Additionally, the method will not cause economic losses, as it is a fast strengthening method. In the light of all these evaluations, it was revealed that a building could be strengthened by using CSBs in buildings with Soft Storey irregularity.

## REFERENCES

- Benavent-Climent, A. & Mota-Paez, S. (2017). Earthquake retrofitting of R/C frames with soft first story using hysteretic dampers: Energy-based design method and evaluation. *Engineering Structures* 137: 19-32.
- DEMC (2019). Disaster and Emergency Management Centre Turkish Earthquake Maps.
- Ebadi, P., Maghsoudi, A. & Mohamady, H. (2018). Soft story retrofit of low-rise braced buildings by equivalent moment-resisting frames. *Structural Engineering and Mechanics* 68(5): 621-632.
- ETABS17 (2018). ETABS v17. In
- Javadi, P. & Yamakawa, T. (2019). Strength and ductility type retrofit of soft-first-story RC frames through the steel jacketed non-reinforced thick hybrid wall. *Engineering Structures* 186: 255-269.
- Ju, M., Lee, K. S., Sim, J. & Kwon, H. (2014). Non-compression X-bracing system using CF anchors for seismic strengthening of RC structures. *Magazine of Concrete Research* 66(4): 159-174.
- Korkmaz, A. & Ucar, T. (2006). Yumuşak Kat Düzensizliğinin Betonarme Binaların Deprem Davranışında Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 11(2): 65-76.
- Lee, K. S. (2015). An Experimental Study on Hybrid Noncompression CF Bracing and GF Sheet Wrapping Reinforcement Method to Restore Damaged RC Structures. *Shock and Vibration*.
- Liu, X. X., Tsang, H. H. & Wilson, J. L. (2019). Seismic retrofit of precast soft-storey building using diagonal steel-shape memory alloy bracing device: Numerical investigation. *Advances in Structural Engineering* 22(3): 802-817.
- Mashhadiali, N. & Kheyroddin, A. (2018). Seismic performance of concentrically braced frame with hexagonal pattern of braces to mitigate soft story behavior. *Engineering Structures* 175: 27-40.
- Mazza, F., Mazza, M. & Vulcano, A. (2018). Base-isolation systems for the seismic retrofitting of r.c. framed buildings with soft-storey subjected to near-fault earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 109: 209-221.
- Mowrtage, W. (2013). Parallel Steel Frame Technique for Seismic Strengthening of Rc Structures: Case Study. *Journal of Earthquake and Tsunami* 7(5).
- Oinam, R. M. & Sahoo, D. R. (2018). Numerical evaluation of seismic response of soft-story RC frames retrofitted with passive devices. *Bulletin of Earthquake Engineering* 16(2): 983-1006.
- Oinam, R. M. & Sahoo, D. R. (2019). Using Metallic Dampers to Improve Seismic Performance of Soft-Story RC Frames: Experimental and Numerical Study. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 33(1).

- Sahoo, D. R. & Rai, D. C. (2013). Design and evaluation of seismic strengthening techniques for reinforced concrete frames with soft ground story. *Engineering Structures* 56: 1933-1944.
- Shin, J., Scott, D. W., Stewart, L. K., Yang, C. S., Wright, T. R. & DesRoches, R. (2016). Dynamic response of a full-scale reinforced concrete building frame retrofitted with FRP column jackets. *Engineering Structures* 125: 244-253.
- TEC2007 (2007). Turkish Earthquake Code. 159 İzmir: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- TEC2018 (2018). Turkish Earthquake Code. 395 Ankara: TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası.
- Thinley, K. & Hao, H. (2017). Seismic response analyses and performance assessment of masonry-infilled reinforced concrete frame buildings in Bhutan without and with soft storey. *Advances in Structural Engineering* 20(5): 822-839.
- Unal, A. & Kaltakci, M. Y. (2016). Seismic behavior of concentrically steel braced frames and their use in strengthening of reinforced concrete frames by external application. *Steel and Composite Structures* 21(4): 687-702.
- Varum, H., Teixeira-Dias, F., Marques, P., Pinto, A. & Bhatti, A. (2013). Performance evaluation of retrofitting strategies for non-seismically designed RC buildings using steel braces. *Bulletin of Earthquake Engineering* 11(4): 1129-1156.
- Yon, B. & Sayın, E. (2011). Betonarme Perdeler ve Çelik Çaprazlarla Yapılan Güçlendirmelerin Karşılaştırılması In *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 237-242 Elazığ, Turkey.



## BATIK ULTRAFİLTRASYON MEMBRAN BİYOREAKTÖRÜ İLE GERÇEK GRİ SU ARITIMI

<sup>1</sup>Can ASAN , <sup>2\*</sup>Levent GÜREL , <sup>3</sup>Hanife BÜYÜKGÜNGÖR 

<sup>1</sup>Dış İlişkiler Eğitim ve Araştırma Daire Başkanlığı, Orman Genel Müdürlüğü, Ankara, TÜRKİYE  
<sup>2</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, TÜRKİYE  
<sup>3</sup>Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, TÜRKİYE  
<sup>1</sup>canasan@ogm.gov.tr, <sup>2</sup>lgurel@pau.edu.tr, <sup>3</sup>hbuyukg@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 15.05.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.07.2019)

**ÖZ:** Bu çalışma kapsamında, batık tip bir membran biyoreaktör (MBR) sistemi, gerçek ortamdan elde edilen gri suyun arıtılabilirliğini ve giderim performansını belirlemek için kullanılmıştır. Kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) gibi kirlilik parametreleri çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmada havalandırma tankına daldırılmış olan membran ünitesi, 0,03 µm ortalama gözenek boyutuna sahip olan bir ultrafiltrasyon modülüdür. Bu membran sistemi 140-280 mbar düzeyindeki bir transmembran basınç aralığında sürekli konfigürasyonda 25 gün boyunca işletilmiştir. Biyoreaktördeki askıda katı madde konsantrasyonu, sürekli konfigürasyondaki MBR arıtım süreci boyunca 2000-3000 mg/L aralığında değişmiştir. Bu periyottaki membran akısı, 29 ile 62 L/m<sup>2</sup>.gün aralığındadır. KOİ, TN ve TP parametrelerindeki giderim verimlilikleri için ortalama değerler sırasıyla %96, %73 ve %64 şeklinde tespit edilmiştir. Bu çalışmalar boyunca elde edilen sonuçlar, yönetmeliklerde yer alan ilgili standartlar ile karşılaştırılmıştır. Çıkış suyundaki KOİ konsantrasyonunun deşarj limitlerinin altında olduğu, TN ve TP konsantrasyonlarının ise deşarj limitlerinin üzerinde ancak bu değerlere yakın oldukları bulunmuştur. Ayrıca sulama amaçlı yeniden kullanım amaçlandığı takdirde, bu çalışmada incelenen parametreler doğrultusunda suyun tekrar kullanımının uygun olacağı değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** KOİ Giderimi, Membran Biyoreaktör, Besi Maddesi Giderimi, Ultrafiltrasyon Membranı

### Real Greywater Treatment by Using Submerged Membrane Bioreactor

**ABSTRACT:** In this study, a submerged type membrane bioreactor was used to determine the removal performance and treatability of greywaters originated from real life. The pollutant parameters such as chemical oxygen demand (COD), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) concentrations were studied. The membrane unit immersed in the aeration tank was an ultrafiltration module with a mean pore size of 0.03 µm. This membrane system was operated for 25 days in continuous mode at a transmembrane pressure interval of 140-280 mbar. The MLSS concentration of the bioreactor was in the range of 2000-3000 mg/L during the continuous MBR treatment period. The flux of the membrane in this period was in the range of 29-62 L/m<sup>2</sup>.d. Average values of COD, TN and TP removal efficiencies were found to be 96, 73 and 64%, respectively. The results obtained in these studies were compared with discharge standards in legislations. Effluent COD concentration was below the discharge limits, while TN and TP concentrations were high but close to the limit values. In addition, if reuse of treated wastewater for irrigation is aimed, it is considered that the reuse of wastewater will be appropriate in the direction of parameters examined in this study.

**Key Words:** COD Removal, Membrane Bioreactor, Nutrient Removal, Ultrafiltration Membrane

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde su kıtlığı önemli bir konu olarak tartışılmakta olup, musluklardan akan sular oldukça değerli görülmektedir. Fakat musluk sularını günlük hijyen amaçlı olarak kullanmak bir zorunluluktur. Atıksuların yeniden kullanımı için geri çevrimi, su ihtiyacının yönetimi açısından iyi bir strateji olarak görülmektedir. Bu yolla, çevredeki kirleticiler en aza indirilebilir ve yüksek kaliteli sular korunmuş olur (Al-Jayyousi, 2003). Bu yüzden, kullanım sonrası bu suları geri kazanmak için ileri arıtma teknolojilerinin kullanılması önemli bir hal almıştır.

Gri suyu ifade etmek için birçok tanım bulunmaktadır. Genellikle, bu tip atıksular tuvaletlerden oluşan atıklarla temasta olmayan evsel atıksular olarak tanımlanabilir. Buna ek olarak, bulaşık makinelerinden ve mutfak lavabolarından kaynaklanan atıksular gri sulara dâhil edilmemektedir. Gri sulara, deri, saç, vücut yağları, diş macunu, şampuanlar, sabunlar, vücut bakım ürünleri, tıraş sonrası atık materyaller, köpük, beyazlatıcılar, azot, fosfor, yüzey aktif maddeler, yağ ve gres, bulanıklık, askıda katılar, bakteriler vb. çeşitli birçok madde bulunabilmektedir (Ghaitidak ve Yadav, 2013).

Merkezi olmayan yaklaşıma göre, arıtma tesisleriyle merkezi atıksu yönetimi oldukça pahalı bir prosestir. Çünkü bazı şehirlerde evlerden merkezi arıtma sistemlerine olan boru hattı mesafeleri oldukça uzun olabilmektedir. Bazen, boru hatlarının inşası ve bakım maliyetleri arıtma tesislerinden daha yüksek düzeylere çıkabilmektedir. Bu yaklaşımla, yerleşim bölgelerinden ortaya çıkan gri sular diğer atıksulardan kaynakta ayrılmakta, toplanmakta, arıtmakta ve bahçe sulaması, tuvalet gider suyu ve diğer temizlik işlemleri gibi amaçlarla tekrar kullanılmaktadır (Abdel-Kader, 2013; Eriksson ve diğ., 2009; Liu ve diğ., 2010).

Sulama ve diğer açık alanda kullanma amaçları dikkate alınmadığı takdirde, sadece gelişmiş ülkelerdeki konutlarda kullanılan su miktarları kişi başına 100 ile 180 L/gün aralığında bulunmaktadır. Bu miktarlar toplam kentsel su tüketiminin %30-70'ine eşit olmaktadır. Atıksuların %60-70'i tuvaletler hariç gri su kategorisine girmektedir (Friedler ve Hadari, 2006). Evlerdeki tüm su kullanımının büyük bir bölümünü, %33 ve %18 oranlarıyla, sırasıyla duşlar ve çamaşır makineleri oluşturmaktadır (Kujawa-Roeleveld ve Zeeman, 2006). Bu yüzdeler toplam gelen suyla karşılaştırıldığında oldukça yüksek gözükmektedir. Bu durum gri suların değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Gri suların kirleticilerin giderimi için kullanılabilecek çeşitli arıtma prosesleri bulunmaktadır. Gri su arıtımında, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik prosesler kullanılmaktadır (Li ve diğ., 2009). Fiziksel arıtım kategorisinde, dezenfeksiyon prosesi ile birlikte kaba toprak, kum ve diğer filtrasyon prosesleri (Katukiza ve diğ., 2014; Zuma ve diğ., 2009) ve hatta membran filtrasyonu (Boddu ve diğ., 2016) kullanılmaktadır. İyon değiştirme (Nawaz ve Sengupta, 2017), foto-katalitik oksidasyon (Sanchez ve diğ., 2010) ve koagülasyon (Friedler ve diğ., 2008) gibi kimyasal arıtım metotları aynı zamanda gri sulara da uygulanmaktadır (Li ve diğ., 2009). Gri suyun geri çevrimi için bu fiziksel ve kimyasal arıtma teknolojilerinin yanı sıra biyolojik prosesler bazı uygulama alanlarına sahip olabilmektedir. Bu biyolojik yöntemlerden bazıları dönen biyolojik kontaktör sistemleri (Abdel-Kader, 2013), anaerobik çamur örtü sistemleri (Elmitwalli ve Otterpohl, 2007), yapay sulak alanlar (Arunbabu ve diğ., 2015; Wurochekke ve diğ., 2014), ve membran biyoreaktörlerdir (Bani-Melhem ve diğ., 2015; Merz ve diğ., 2007).

Membran biyoreaktörler (MBR) biyolojik prosesler ile membran teknolojisini birleştiren biyolojik arıtım sistemleridir (Judd, 2008). Bu sistemlerde, membran filtrasyonunun bir sonucu olarak son çöktürme havuzlarına, kum filtrasyonuna (Melin ve diğ., 2006) ve aynı zamanda dezenfeksiyon uygulamalarına (Lv ve diğ., 2006) ihtiyaç bulunmamaktadır. MBR sistemleri sızıntı sularının, evsel ve endüstriyel atıksuların arıtımı için kullanılabilmektedir. Aynı zamanda su ıslahı ve tekrar kullanım membran teknolojisi sayesinde başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir (Innocenti ve diğ., 2002). MBR proseslerinin katı madde alıkonma süresi reaktörde atıksuyun hidrolik alıkonma süresinden bağımsız olmaktadır. Böylelikle, F/M (besin/mikroorganizma) oranı en aza indirilerek biyoreaktör içinde yüksek çamur konsantrasyonları sağlanabilmektedir. Düşük F/M oranları ve yüksek çamur yaşlarında, çamur üretimi düşmektedir (Rosenberger ve diğ., 2002). Batık tip membran sistemleri enerji tüketimi

esas alındığında daha etkili gözükmektedir. MBR sistemleri kirleticileri etkili bir şekilde giderebilmekte ve aynı zamanda da şok ve yüksek atıksu yüklerini karşılamaktadır (Guo ve diğ., 2008).

Bu çalışmada, batık tip membran biyoreaktör sistemi, gerçek ev ortamından temin edilen gerçek ölçekli gri sudan organik kirleticileri, toplam azot ve toplam fosforu gidermek amacıyla kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, aerobik MBR sisteminin performansını ortaya koymak ve gri suların kullanım alanlarındaki standartların tespit edilmesine yardımcı olacak yararlı verileri elde etmektir.

## MATERYAL VE YÖNTEM(MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, gerçek gri suyun özellikleri, deneylerden kullanılan ekipmanlar ve deneysel işleyiş verilmiştir.

### Gri Suyun Özellikleri ve Analizler(Greywater Characteristics and Analyses)

Bu çalışmada kullanılan gri sular bir evde bulunan el yıkama lavabosu ve çamaşır makinesinden ortaya çıkan atıksulardan oluşmaktadır. Bu gri sular 2 ve 3 gün aralıklarla bu kaynaklardan toplanmıştır. Reaktöre yapılacak olan besleme işleminde kullanılacak olan tank bu su ile doldurulmuştur. Bu besleme tankında, ayrıca sürekli bir şekilde havalandırma gerçekleştirilmiş olup, böylelikle yüzebilen maddelerin gri sudan ayrılması hedeflenmiştir. Havalandırma işleminin uygulandığı biyoreaktör ise bu tank vasıtasıyla beslenmiştir. Bu gri suyun özellikleri Çizelge 1’de verilmektedir. Arıtım çalışmalarında, KOİ, toplam azot ve toplam fosfor parametreleri analizleri, Merck Spectroquant Nova 60 fotometresi kullanılarak Merck marka test kitleri ile gerçekleştirilmiştir. Toplam koliform, BOİ analizleri ve askıda katı madde ölçümleri Standart Metotlar’a (APHA, 1985) göre uygulanmıştır.

Bu gri suya uygulanan KOİ ve BOİ analizleri neticesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu değerlerin Türkiye’deki deşarj limitlerine göre oldukça yüksek olduğu Çizelge 1’den net bir şekilde görülebilmektedir. Aynı zamanda, bu atıksuyun mikrobiyolojik açıdan da yüksek konsantrasyonlarda mikroorganizma içerdiği ve tekrar kullanım için mutlak arıtılması gerekliliği söz konusudur.

**Çizelge 1.** Gri suyun özellikleri

*Table 1. Characteristics of greywater*

| Parametre                    | Min               | Maks              | Deşarj limitleri<br>SKKY, 2008 |
|------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| KOİ (mg/L)                   | 451               | 812               | 90                             |
| BOİ (mg/L)                   | 165               | 213               | 35                             |
| Toplam azot (mg/L)           | 60                | 68                | -                              |
| Toplam fosfor (mg/L)         | 5,0               | 7,5               | -                              |
| Toplam koliform (cfu/100 mL) | 1.10 <sup>6</sup> | 5.10 <sup>9</sup> | -                              |

### Deneysel İşleyiş(Experimental Process)

Çalışmalarda 34 L hacminde bir biyoreaktör kullanılmıştır. Gri su, 25 L kapasiteli bir besleme tankından reaktöre verilmiştir. Deney biyoreaktörünün içinde kullanılan aktif çamur yerel bir atıksu arıtma tesisinden sağlanmış olup, reaktör içerisine eklendikten sonra iki hafta boyunca membran filtrasyonu uygulanmaksızın havalandırılmıştır. Bu esnada, aktif çamurdaki mikroorganizmaların atıksuya alışması maksadıyla atıksu sırasıyla %10, 25, 50, 75 oranlarında seyreltilmek suretiyle aktif çamura eklenmiş olup seyreltme oranları üç günde bir artırılmıştır. Bu iki haftalık dönem boyunca biyoreaktör kesikli tip işletim modunda ve membran dahil edilmeden çalıştırılmıştır. Bu periyodun ardından, membran modülü biyoreaktör içerisine yerleştirilmiş ve sürekli işletim modu uygulanmaya başlanmıştır. Sürekli arıtım çalışmalarında kullanılan membran modülü polisülfon materyalinden

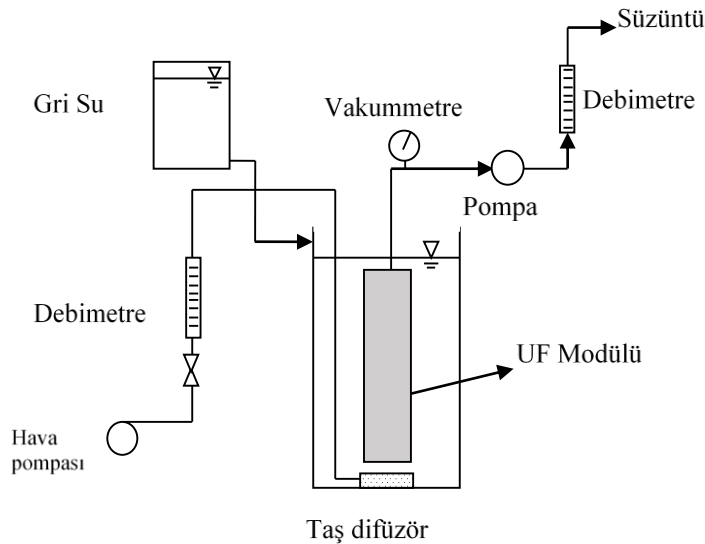
üretilmiş olup, 0.03  $\mu\text{m}$  gözenek boyutuna sahip bir ultrafiltrasyon membranıdır. Kullanılan membran modülüne ait çeşitli özellikler Çizelge 2’de sunulmaktadır.

**Çizelge 2.** Membran modülünün özellikleri

*Table 2. Characteristics of membrane module*

|   |         |
|---|---------|
| Modül çapı (m)  | 0,1     |
| Gözenek boyutu ( $\mu\text{m}$ )                        | 0,03    |
| Etkin uzunluk (m)                                       | 0,24    |
| Fiber iç çapı (m)                                       | 0,008   |
| Fiber dış çapı (m)                                      | 0,01    |
| Bir modüldeki fiber sayısı                              | 32      |
| Fiber yüzey alanı (m <sup>2</sup> )                     | 0,00603 |
| Bir modülün toplam yüzey alanı (m <sup>2</sup> /module) | 0,193   |

Sürekli işletim tarzı boyunca membran akışı 28,5-62,0 L/m<sup>2</sup>.gün aralığında tutulmuştur. Arıtım çalışmaları boyunca düşük ve yüksek pH değerlerinin olumsuz etkilerinden korunabilmek için pH değeri 7 ile 8 civarlarında korunmuştur. Havalandırma işlemi için bir havalandırma pompası kullanılmış olup, aktif çamur prosesindeki canlı ortam için yeterli miktarda oksijen sağlamak amacıyla hava akış hızı 5-6 L/dk aralığında uygulanmıştır. Aynı zamanda havalandırma işlemi ile birlikte biyoreaktör içerisindeki biyokütle karıştırılmış ve membran yüzeyi üzerinde de birikmenin en aza indirilmeli sağlanmıştır. Membran sistemindeki transmembran basıncı (TMB), tüm arıtım işlemi boyunca 0,28 bara kadar artış göstermiştir. Membran biyoreaktör sistemi (Gürel ve Büyükgüngör, 2011) tarafından yapılan çalışmada kullanılan sistem ile benzerlik taşımakta olup, bu çalışmada kullanılan membran modülü ve deney sisteminin detaylı bir şeması Şekil 1’de gösterilmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen ölçümlerde ön havalandırma işlemine giriş bölümünden ve membran çıkışından örnekler alınarak tüm sistemin giriş ve çıkış KOİ, toplam fosfor ve azot konsantrasyonları hesaplanarak verimler elde edilmiştir.



**Şekil 1.** UF membran sistemi

*Figure 1. UF membrane system*

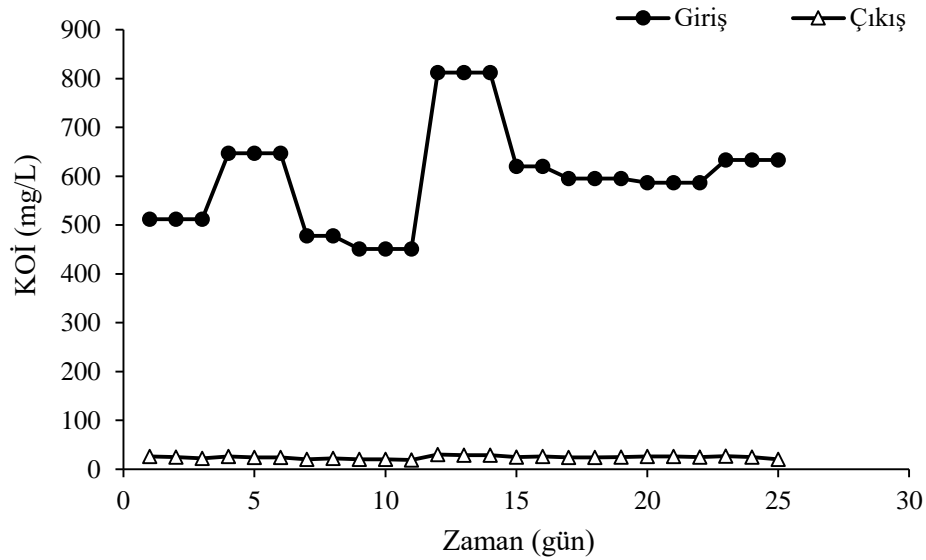


## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada gerçek gri su örneğinin KOİ, toplam fosfor ve toplam azot konsantrasyonlarının bir ultrafiltrasyon membranı bulunan bir biyoreaktör kullanılarak biyolojik olarak arıtılması amaçlanmıştır. Tüm arıtım prosesi boyunca reaktördeki AKM konsantrasyonu 2000 ile 3000 mg/L arasında değişiklik göstermiştir.

### KOİ Arıtımı (COD Treatment)

Biyoreaktörün KOİ konsantrasyonu, batık membran biyoreaktör sisteminin arıtım verimini ve performansını belirlemek için günlük olarak izlenmiştir. Bu biyoreaktörün hidrolik alıkonma süresi ortalama 45 L/m<sup>2</sup>gün'lük ortalama bir membran akışı için ortalama olarak 93,6 saattir. Bu değerler, gri suyun başarılı bir şekilde arıtımı için oldukça yeterli görünmektedir. Çalışılan dönem boyunca elde edilmiş olan sonuçlar Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Batık membran biyoreaktörle organik madde giderimi

Figure 2. Removal of organic substance by submerged membrane bioreactor

Arıtım prosesi boyunca ham gri suya ait KOİ konsantrasyonu değişiklik göstermiştir. Buna karşın, membran biyoreaktörün arıtım verimi bu gri suyun değişken organik yükünden etkilenmemiştir. Bu membran sisteminin maksimum giderim verimi %97 olarak bulunmuştur. Giderim çalışmalarının ardından, çıkış suyuna ait minimum ve maksimum KOİ değerleri sırasıyla 19 ile 30 mg/L olarak bulunmuştur. Gri suyun başarılı bir şekilde arıtılması için en önemli unsurlardan biri atıksuyun reaktörde uzun hidrolik alıkonma süresidir. Biyoreaktör içindeki mikroorganizmalar, uzun alıkonma sürelerinde giderim verimini maksimize ederek organik maddelerin parçalanmasını sağlamışlardır. Santasmasas ve diğ., 2013 tarafından yürütülen bir çalışmada gri suları arıtmak için polietersülfon membranları kullanılmıştır. KOİ giderim veriminin %90 değerlerine ulaştığı bulunmuştur. Aynı zamanda yapmış oldukları çalışmada elde ettikleri sonuçları Avrupa Direktifi 91/271 EEC (CEC, 1991) ile karşılaştırmışlar ve KOİ değerlerinin bu direktif tarafından belirlenmiş olan sınır değerlerin altında kaldığını saptamışlardır (Santasmasas ve diğ., 2013).

Bir başka çalışma spor ve sosyal tesislerden gri suyun arıtımı için yürütülmüştür. Söz konusu çalışmada kullanılan membran boşluklu fiber tipi bir ultrafiltrasyon membranı olup, gözenek boyutu 0,1 µm'dir. Sisteme uygulanmış olan maksimum transmembran basıncı 0,4 bar'dır. Arıtım işlemi neticesinde çıkış suyunda elde ettikleri minimum KOİ konsantrasyonu 15 mg/L olup, %85 verime

ulaşmışlardır (Merz ve diğ., 2007). Bani-Melhem ve diğ., 2015 tarafından yürütülen bir çalışmada ise gözenek boyutu 0,04 µm olan bir ultrafiltrasyon membranı kullanılarak gri su giderimi araştırılmıştır. Çalışmalarında, membran arıtım süreci boyunca ortalama olarak %88 KOİ giderim verimi elde etmişlerdir. Ortama olarak çıkış suyunda ulaştıkları KOİ konsantrasyonu 45 mg/L olarak verilmiştir (Bani-Melhem ve diğ., 2015).

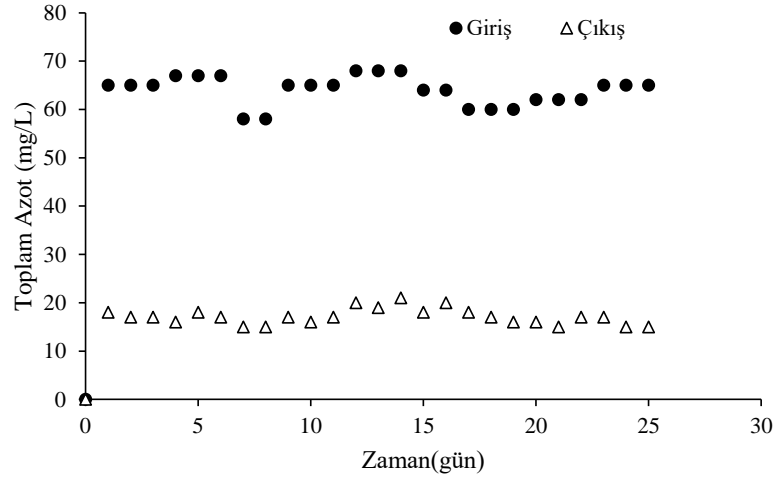
Yukarıda anılan çalışmaların ışığında, bu çalışmada ortalama olarak %96'lık bir KOİ giderim veriminin, bu membranın gerçek gri suların organik maddelerin gideriminde çok başarılı olduğu sonucunu ortaya koyduğu söylenebilir. Aynı zamanda membran biyoreaktör çıkışından elde edilen arıtılmış gri suyun tekrar kullanılabilirliğine karar vermek için bir kalite karşılaştırması yapmak gerekmektedir. Tüm çalışma periyodunda çıkış suyundaki ortalama KOİ konsantrasyonu 24 mg/L olarak analiz edilmiştir. Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliğinde, alıcı ortama atıksuların deşarj edilebilmesi için KOİ parametresinin maksimum izin verilebilen değeri 180 mg O<sub>2</sub>/L (nüfus aralığı 84-2000) olarak verilmektedir (SKKY, 2008). Aynı zamanda Avrupa Direktifi 91/271 EEC için, bu limit değeri 125 mg O<sub>2</sub>/L'dir (CEC, 1991). Bu düzenlemelerin deşarj limitleri, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığı takdirde, arıtılmış suda analiz edilen 24 mg/L'lik KOİ konsantrasyonunun bu değerlerin oldukça altında kaldığı açık bir şekilde görülebilmektedir. Ayrıca ülkemizde atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili yasal düzenleme (AATTUT, 2010) incelendiğinde KOİ değerine bağlı bir değerlendirme yapılmadığı, sadece BOİ değerinin ele alındığı görülmektedir. Buna bağlı olarak deney sonuçları neticesinde KOİ değerine eşdeğer olacak BOİ değerinin yönetmelik gereği 20 mg/L'den aşağıda olacağı net bir şekilde anlaşılabilmektedir.

#### **Toplam Azot Giderimi (Removal of Total Nitrogen)**

Besi maddeleri biyolojik arıtma proseslerinde mikroorganizmalar için çok önemli besin kaynaklarıdır. Özellikle, besi maddeleri olan azot ve fosfor elementlerinin optimum bir miktarı, biyolojik arıtımın başarılı bir şekilde gerçekleşmesini temin etmek için sucul ortamda bulundurulmalıdır. Fakat bu besi maddeleri arıtılmış çıkış sularında deşarj limitlerinin altında bir seviyeye indirilmedikçe alıcı sucul ortam için çok tehlikeli bir hal almaktadır. Aerobik MBR sisteminin toplam azot giderim verimini gözlemlemek için toplam azot konsantrasyonları her gün analiz edilmiştir.

Zamana karşı giriş ve çıkış atıksuyundaki toplam azot konsantrasyonları Şekil 3'te gösterilmektedir. Gri suyun toplam azot konsantrasyonu 58-68 mg/L arasında değişim göstermiştir. Çıkış suyunda rastlanılan en düşük toplam azot konsantrasyonu tüm işletim periyodu boyunca 15 mg/L olarak tespit edilmiştir. MBR prosesinin ortalama verimi %74 olarak bulunmuş olup, konvensiyonel aktif çamur biyoreaktörleri ile karşılaştırıldığında oldukça iyi bir değerdir. Scheumann ve Kraume 2009, batık bir membran ardışık kesikli reaktörü ile çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada kullanılan membran ünitesinin gözenek boyutu 0,4 µm'dir. Çalışmalarında, ortalama çıkış toplam azot konsantrasyonunu 4,1 mg/L olarak elde etmişlerdir. Toplam azot için elde edilmiş olan giderim verimi %76 olarak tespit edilmiştir. Çalışmalarında kullandıkları anoksik koşullar toplam azot giderim verimliliğine pozitif olarak yansımıştır (Scheumann ve Kraume, 2009).

Ma ve diğ., 2015 tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise membran biyoreaktör ile donatılmış olan bir gri su arıtım sistemi 250 m<sup>3</sup>'lük etkili hacme sahiptir. Bu prosesle, atıksudaki toplam azot konsantrasyonu 12,3-38,7 mg/L değerlerinden 9-27 mg/L değerlerine düşürülmüş olup, sadece ortalama %29'luk bir arıtım verimi elde edilmiştir (Ma ve diğ., 2015).



**Şekil 3.** Batık MBR sisteminde toplam azot konsantrasyonundaki değişimler

*Figure 3.* Variation of total nitrogen concentrations in submerged MBR system

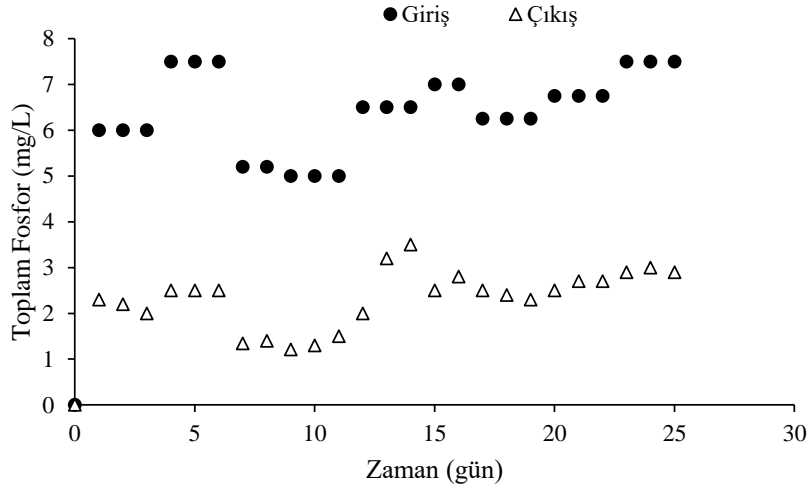
Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde, toplam azot konsantrasyonlarıyla ilgili sınır değerler bulunmamaktadır (SKKY, 2008). Bununla birlikte, Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği'nde ileri arıtma prosesleri çıkış sularında toplam azot konsantrasyonu için sınır değer 15 mg/L olarak belirtilmiştir (KAAY, 2006). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda arıtılmış gerçek gri suyun toplam azot konsantrasyonu en düşük 15 mg/L değerine kadar indirilebilmiştir. Bu değer yukarıda anılan sınır değere eşittir. Aynı zamanda bu çalışmada kullanılan batık MBR sisteminin ortalama çıkış toplam azot konsantrasyonu 17 mg/L olarak elde edilmiştir. Bu arıtılmış atıksu için söz konusu toplam azot konsantrasyonu gerekli deşarj sınır değerlerini karşılamamaktadır. Bu noktada, maksimum verim ve daha düşük toplam azot konsantrasyonlarının elde edilebilmesi için mevcut biyolojik arıtma sistemine anoksik arıtım prosesinin dâhil edilmesi zorunlu gözükmemektedir. Ayrıca atıksuların geri kazanımı ve yeniden kullanımı ile ilgili bilgilerin yer aldığı tebliğde (AATTUT, 2010), geri kazanılmış suların sulama için faydalı olan besin maddelerini içerdiği ve bunun bitki büyümesini etkilediği belirtilmektedir. Bu açıdan, söz konusu tebliğde MBR ile sağlanabilecek geri kazanım neticesinde elde edilen atıksuda toplam azotun 7 ila 18 mg/L arasında olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmada da ortalama toplam azot konsantrasyonu arıtılmış atıksuda 17 mg/L olarak belirlenmiştir.

#### **Toplam Fosfor Giderimi (Total Phosphorus Removal)**

Toplam azotla birlikte toplam fosfor parametresi alıcı ortamlarda ve biyolojik arıtma tesislerinde canlı halde olan tüm mikroorganizmalar için ana besin maddeleridir. Toplam fosfor, alıcı ortamlardaki ötrofikasyonu önlemek için etkili bir şekilde atıksulardan uzaklaştırılmalıdır. Gri suların aerobik arıtımında, toplam fosfor doğal olarak belli bir seviyeye kadar artılmaktadır. Fakat aynı zamanda, çıkış suyunda toplam fosforun azımsanmayacak bir miktarı kalabilmekte ve bu durum, alıcı su ortamlarına atıksu verilmeden önce daha ileri bir arıtımı gerekli kılabilir.

Bu çalışmada, batık membran biyoreaktör ile gri suyun arıtımından önce ve sonra toplam fosfor konsantrasyonları izlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4'te gösterilmektedir.

Ham gerçek gri su örneklerindeki toplam fosfor konsantrasyonu 5,0-7,5 mg/L aralığında değişim gösterirken, arıtılmış çıkış suyunda ise bu değer aralığının 1,21-3,50 mg/L olduğu bulunmuştur. Ortalama olarak bu aerobik batık membran biyoreaktörün toplam fosfor giderim verimliliği ortalama %64 olarak elde edilmiştir. Anaerobik ve anoksik safhaları bulunmayan bu aerobik arıtım prosesinin giderim verimliliği çok ta düşük gözükmemektedir. Fountoulakis ve diğ. 2016 tarafından gerçekleştirilmiş olan bir çalışmada, gri suyun arıtımı için düz levha şeklindeki bir membran modülü (0,04 µm gözenek boyutlu) kullanılmış olup, batık membran biyoreaktör sisteminden %69'luk bir toplam fosfor giderim verimi elde edilmiştir (Fountoulakis ve diğ., 2016).



Şekil 4. Toplam fosfor konsantrasyonundaki değişim

Figure 4. Variation of total phosphorus concentration

Aerobik koşullar altındaki konvansiyonel bir reaktörde, *acinetobacter* isimli mikroorganizma aktif çamur karışık sıvısının oldukça önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Oran olarak ifade etmek gerekirse bu değer yaklaşık olarak %40'ı bulmaktadır. Bu mikroorganizma anaerobik koşullar altında polihidroksibütirat (PHB) olarak adlandırılan depo polimerlerini oluşturmakta ve PHB'leri oluşturmak için gerekli olan enerjiyi sahip olduğu polifosfat granüllerini depolimerize ederek sağlamaktadır. Aerobik koşullar söz konusu olduğunda ise, bu mikroorganizma PHB ve diğer besi elementlerini karbon kaynağı olarak kullanır ve bünyesine fosforu depolamaya başlar. *Acinetobacter* tarafından aerobik koşullarda depolanan fosfor miktarı, anaerobik koşullarda salınan fosforun iki katı olarak belirtilmektedir (Büyükgüngör, 2003). Dolayısıyla, bu durum membran destekli aktif çamur prosesinde toplam fosfor giderimine açıklık kazandırmaktadır.

Toplam fosfor konsantrasyonları için toplam azot deşarj standartlarının da belirlendiği Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği hükümleri geçerlidir. Bu yönetmelik kapsamında, toplam fosfor için sınır konsantrasyon değeri 2 mg/L olarak belirlenmiştir (KAAY, 2006). Bu çalışmada kullanılan membran sistemi için elde edilen minimum toplam fosfor konsantrasyonu 1,21 mg/L iken, maksimum değer 3,50 mg/L olarak bulunmuştur. Bu noktada, sistemden elde edilmiş olan ortalama fosfor konsantrasyonunun deşarj sınır değerlerinin üzerinde olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Fakat, bu membran biyoreaktör sisteminin çıkış suyu toplam fosfor değerleri deşarj standartlarına oldukça yakın olarak bulunmuştur. Ayrıca geri kazanım ile ilgili tebliğ (AATTUT, 2010) toplam fosfor açısından incelendiğinde, MBR sistemi ile elde edilebilecek arıtılmış sudaki toplam fosfor konsantrasyonlarının 0,3 ile 5 mg/L arasında olması gerektiği belirtilmektedir. Bu açıdan arıtılmış suda elde edilen ortalama fosfor konsantrasyonlarının bu aralıkta kaldığı net bir şekilde görülebilmektedir.

## SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada gerçek gri suların arıtımı için kullanılan bir batık membran biyoreaktörünün performansı incelenmiştir. KOİ, toplam azot ve toplam fosfor konsantrasyonları membran biyoreaktörün minimum, maksimum ve ortalama giderim verimliliklerini belirlemek için günlük olarak izlenmiştir. Bir evden temin edilen gerçek gri su, membran sistemi ile başarılı bir şekilde arıtılmış olup, ortalama olarak %96 mertebesinde KOİ giderimi elde edilmiştir. Çıkış suyunda artı kalan KOİ konsantrasyonu, Türk Yasaları kapsamında belirlenmiş olan deşarj ve tekrar kullanım standartlarına göre kabul edilebilir bir değere sahiptir. Aynı zamanda, arıtılmış gri sudaki toplam azot ve toplam fosfor konsantrasyonları bu yasalar kapsamında söz konusu olan sınır değerlere oldukça yakın olarak

bulunmuştur. Ayrıca ilgili tebliğlerde MBR sistemi kullanılarak geri kazanım neticesinde elde edilmesi beklenen arıtılmış atık sudaki toplam azot ve toplam fosfor konsantrasyon değerlerinin, bu çalışmada elde edilen sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Batık membran biyoreaktörün arıtım verimlerinin aerobik bir biyolojik arıtma sistemine göre yüksek olmasına karşın, toplam azot ve toplam fosfor konsantrasyonlarının ortalama değerleri, grisu için deşarj yönetmelik değerlerinin yine de üzerinde yer almaktadır. Eğer atıksu deşarj edilecekse, yönetmelik değerlerinin tam olarak sağlanması, biyoreaktördeki aerobik koşullara ek olarak anoksik ve anaerobik şartları sağlayacak bir arıtım sistemiyle mümkün olabilecektir. Bunun haricinde atıksuyun geri kazanım neticesinde sulamada kullanılması amaçlanıyorsa, bu MBR sisteminin yeniden kullanım için organik madde, toplam azot ve toplam fosfor açısından gerekli arıtımı sağlamış olduğu sonucuna varılabilir.

#### KATKI BELİRTME(ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar Ondokuz Mayıs Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümüne sağlamış oldukları laboratuvar olanakları için teşekkür eder. Ayrıca bu çalışma Ondokuz Mayıs Üniversitesi tarafından PYO.MUH.1904.09.006 proje numarası ile desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR(REFERENCES)

- AATTUT, 2010, Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Türkiye.
- Abdel-Kader, A.M., 2013, "Studying the efficiency of grey water treatment by using rotating biological contactors system", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Cilt 25, ss. 89–95.
- Al-Jayyousi, O.R., 2003, "Greywater reuse: towards sustainable water management", *Desalination*, Cilt 156, ss. 181–192.
- APHA, 1985, Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater, Sixteenth. ed. American Public Health Association, Washington, DC, ABD.
- Arunbabu, V., Sruthy, S., Antony, I., Ramasamy, E.V., 2015, "Sustainable greywater management with axonopus compressus (broadleaf carpet grass) planted in sub surface flow constructed wetlands", *Journal of Water Process Engineering*, Cilt 7, ss. 153–160.
- Bani-Melhem, K., Al-Qodah, Z., Al-Shannag, M., Qasaimeh, A., Rasool Qtaishat M., Alkasrawi, M., 2015, "On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system", *Journal of Membrane Science*, Cilt 476, ss. 40–49.
- Boddu, V.M., Paul, T., Page, M.A., Byl, C., Ward, L., Ruan, J., 2016, "Gray water recycle: effect of pretreatment technologies on low pressure reverse osmosis treatment", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Cilt 4, ss. 4435–4443.
- Büyüküngör, H., 2003, Atıksu Arıtma Yöntemleri, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye.
- CEC, 1991, Council Directive of 21 May 1991 Concerning Urban Waste Water Treatment (91/271/EEC).
- Elmitwalli, T.A., Otterpohl, R., 2007, "Anaerobic biodegradability and treatment of grey water in upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor", *Water Research*, Cilt 41, ss. 1379–1387.
- Eriksson, E., Andersen, H.R., Madsen, T.S., Ledin, A., 2009, "Greywater pollution variability and loadings", *Ecological Engineering*, Cilt 35, ss. 661–669.
- Fountoulakis, M.S., Markakis, N., Petousi, I., Manios, T., 2016, "Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing", *Science of the Total Environment*, Cilt 551–552, ss. 706–711.
- Friedler, E., Hadari, M., 2006, "Economic feasibility of on-site greywater reuse in multi-storey buildings", *Desalination*, Cilt 190, ss. 221–234.
- Friedler, E., Katz, I., Dosoretz, C.G., 2008, "Chlorination and coagulation as pretreatments for greywater desalination", *Desalination*, Cilt 222, ss. 38–49.
- Ghaitidak, D.M., Yadav, K.D., 2013, "Characteristics and treatment of greywater---A review", *Environmental Science and Pollution Research*, Cilt 20, ss. 2795–2809.

- Guo, W., Vigneswaran, S., Ngo, H.-H., Xing, W., Goteti, P., 2008, "Comparison of the performance of submerged membrane bioreactor (SMBR) and submerged membrane adsorption bioreactor (SMABR)", *Bioresource Technology*, Cilt 99, ss. 1012–1017.
- Gürel, L., Büyükgüngör, H., 2011, "Treatment of slaughterhouse plant wastewater by using a membrane bioreactor", *Water Science and Technology*, Cilt 64, ss. 214–219.
- Innocenti, L., Bolzonella, D., Pavan, P., Cecchi, F., 2002, "Effect of sludge age on the performance of a membrane bioreactor: Influence on nutrient and metals removal", *Desalination*, Cilt 146, ss. 467–474.
- Judd, S., 2008, "The status of membrane bioreactor technology". *Trends in Biotechnology*, Cilt 26, ss. 109–116.
- KAAY, 2006, *Kentsel Atıksu Arıtımı Yönetmeliği*, Türkiye.
- Katukiza, A.Y., Ronteltap, M., Niwagaba, C.B., Kansime, F., Lens, P.N.L., 2014, "Grey water treatment in urban slums by a filtration system: Optimisation of the filtration medium", *Journal of Environmental Management*, Cilt 146, ss. 131–141.
- Kujawa-Roeleveld, K., Zeeman, G., 2006, "Anaerobic treatment in decentralised and source-separation-based sanitation concepts", *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Cilt 5, ss. 115–139.
- Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R., 2009, "Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses", *Science of the Total Environment*, Cilt 407, ss. 3439–3449.
- Liu, S., Butler, D., Memon, F.A., Makropoulos, C., Avery, L., Jefferson, B., 2010, "Impacts of residence time during storage on potential of water saving for grey water recycling system", *Water Research*, Cilt 44, ss. 267–277.
- Lv, W., Zheng, X., Yang, M., Zhang, Y., Liu, Y., Liu, J., 2006, "Virus removal performance and mechanism of a submerged membrane bioreactor", *Process Biochemistry*, Cilt 41, ss. 299–304.
- Ma, D., Chen, L., Liu, C., Bao, C., Liu, R., 2015, "Biological removal of antiandrogenic activity in gray wastewater and coking wastewater by membrane reactor process", *Journal of Environmental Sciences (China)*, Cilt 33, ss. 195–202.
- Melin, T., Jefferson, B., Bixio, D., Thoeye, C., De Wilde, W., De Koning, J., van der Graaf, J., Wintgens, T., 2006, "Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse", *Desalination*, Cilt 187, ss. 271–282.
- Merz, C., Scheumann, R., El Hamouri, B., Kraume, M., 2007, "Membrane bioreactor technology for the treatment of greywater from a sports and leisure club", *Desalination*, Cilt 215, ss. 37–43.
- Nawaz, T., Sengupta, S., 2017, "Silver recovery from greywater: Role of competing cations and regeneration", *Separation and Purification Technology*, Cilt 176, ss. 145–158.
- Rosenberger, S., Krüger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U., Kraume, M., 2002, "Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water", *Water Research*, Cilt 36, ss. 413–420.
- Sanchez, M., Rivero, M.J., Ortiz, I., 2010, "Photocatalytic oxidation of grey water over titanium dioxide suspensions", *Desalination*, Cilt 262, ss. 141–146.
- Santasmassas, C., Rovira, M., Clarens, F., Valderrama, C., 2013, "Grey water reclamation by decentralized MBR prototype", *Resources, Conservation and Recycling*, Cilt 72, ss. 102–107.
- Scheumann, R., Kraume, M., 2009, "Influence of hydraulic retention time on the operation of a submerged membrane sequencing batch reactor (SM-SBR) for the treatment of greywater", *Desalination*, Cilt 246, ss. 444–451.
- SKKY, (2008), *Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği*, Türkiye.
- Wurochekke, A.A., Harun, N.A., Mohamed, R.M.S.R., Kassim, A.H.B.M., 2014, "Constructed wetland of *Ilex pedunculata* for household greywater treatment", *APCBEE Procedia*, Cilt 10, ss. 103–109.
- Zuma, B.M., Tandler, R., Whittington-Jones, K.J., Burgess, J.E., 2009, "Mulch tower treatment system part I: Overall performance in greywater treatment", *Desalination*, Cilt 242, ss. 38–56.



## HIGHLY ACTIVE AND ROBUST PALLADIUM NANOPARTICLES IMMOBILIZED ON BIODEGRADABLE MICROCAPSULES CONTAINING CHITOSAN-GUAR GUM COMPOSITE FOR SYNTHESIS OF BIARYL COMPOUNDS

<sup>1</sup>Talat BARAN

<sup>1</sup>Aksaray University, Faculty of Science and Letters, Department of Chemistry, 68100 Aksaray, TURKEY  
<sup>1</sup>talatbaran@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 26.03.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 03.07.2019)

**ABSTRACT:** In this study, highly stable biodegradable microcapsules, which are composed of chitosan-guar gum composite (CS-GG), were prepared as catalyst support. Then, palladium nanoparticles were successfully decorated on the designed support without using any toxic reducing agent (Pd NPs@CS-GG). Structural characterizations of CS-GG and Pd NPs@CS-GG were carried out by different analytical techniques and it was detected that the size of palladium nanoparticles changed in the range of 23-48 nm. Then, the catalytic activity of Pd NPs@CS-GG was evaluated in the fabrication of various biaryl compounds under solventless media using microwave heating. Pd NPs@CS-GG showed high catalytic performance in the conversion of various aryl halides to desired biaryl compounds with good reaction yields. Moreover, it was found that Pd NPs@CS-GG was a catalyst having long life time because of its reuse at least seven times.

**Key Words:** Chitosan, Microcapsule, Catalyst, Palladium Nanoparticle

### Biaril Bileşiklerinin Sentezi İçin Kitosan-Guar Sakızı Kompoziti İçeren Biyobozunur Mikrokapüller Üzerine İmmobilize Edilmiş Oldukça Aktif ve Sağlam Paladyum Nanopartiküller

**ÖZ:** Bu çalışmada, kitosan-guar sakızı kompozitinden (CS-GG) oluşan son derece kararlı biyobozunur mikro kapsüller, katalizör desteği olarak hazırlandı. Daha sonra, paladyum partikülleri, herhangi bir toksik indirgeyici madde kullanmadan tasarlanan destek üzerine başarıyla dekore edildi (Pd NP@CS-GG). CS-GG ve Pd NP@CS-GG'lerin yapısal karakterizasyonu farklı analitik tekniklerle yapıldı ve paladyum nanopartiküllerinin boyutunun 23-48 nm aralığında değiştiği tespit edildi. Daha sonra, Pd NP @ CS-GG'nin katalitik aktivitesi, mikrodalga ısıtma kullanılarak çözücüsüz ortam altında çeşitli biaryl bileşiklerin üretiminde değerlendirildi. Pd NPs@CS-GG, çeşitli aril halojenürlerin iyi reaksiyon verimleriyle istenilen biaryl bileşiklerine dönüştürülmesinde yüksek katalitik performans gösterdi. Ayrıca, Pd NPs@CS-GG'nin, en az yedi kez tekrar kullanımı nedeniyle uzun yaşam süresine sahip bir katalizör olduğu bulundu.

**Anahtar Kelimeler:** Kitosan, Mikro Kapsül, Katalizör, Paladyum Nanopartikül

## INTRODUCTION

Noble metal nanoparticles have recently attracted much attention due to their interesting chemical structure and electronic, mechanical, optical, and magnetic properties. Therefore, they have been widely used in different application areas such as photonics, electronics, biology and medicine (Daniel and

Astruc, 2004; Nasrollahzadeh et al., 2015; Rai et al., 2009). On the other hand, one of the most significant promising application area of metal nanoparticles is the use as catalyst in catalytic reactions (Gholinejad et al., 2017; Sudhakar and Soni, 2018). For these reasons, researchers have prepared different types of noble nanoparticles such as Cu, Ag, Au and Pt to use in catalytic applications (Naghdi et al., 2018; Nasrollahzadeh et al., 2015; Nasrollahzadeh et al., 2018; Rathi et al., 2016). Among noble metal nanoparticles, palladium nanoparticles are the most widely used as catalyst in the catalytic reactions due to their unique properties such as good thermal stability, high chemical stability and photo catalytic activity (Chen and Ostrom, 2015; Phan et al., 2019). On the other hand, one of the most important problem in the synthesis of nanoparticles is aggregation and it can be negatively affect catalytic activity of catalyst (Cui et al., 2017). The best way to overcome this problem is immobilization of nanoparticles on suitable solid supports (Nasrollahzadeh et al., 2019). Additionally, shape, size and stability of nanoparticles depend on support. Therefore, there is need ideal support for immobilization of nanoparticles. In recent years, researchers have used different inorganic materials such as zeolite (Xue et al., 2016), TiO<sub>2</sub> (Atarod et al., 2016), graphene oxide (Zahed and Hosseini-Monfared, 2015), perlit (Nasrollahzadeh et al., 2015), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Veisi et al. 2015), and carbon nanotube (Xiang et al., 2003) as support for fabrication of metallic nanoparticles.

Natural biopolymers are important materials due to their low cost, large surface area, renewability, biocompatibility, high thermal stability, and environmentally friendly properties (Baran, 2017; Rajender Reddy et al., 2006). These outstanding properties make biopolymers or their composites an important candidate as stabilizer for immobilization of metallic nanoparticles. Chitosan and guar gum are the most important members of the polysaccharide family. Chitosan is a cationic carbohydrate polymer which is derived by deacetylation of chitin obtained from waste products of sea such as shrimp, crab, krill, and crayfish (Baskar and Kumar, 2009; Tajik et al., 2008). Guar gum is a biopolymer with high molecular weight that is commonly extracted from the seed of the leguminous shrub *Cyamopsis tetragonoloba* (Mudgil et al., 2014; Pal et al., 2011). Additionally, chitosan and guar gum versatile materials are very economical, easily available and abundant in nature (Thombare et al., 2016; Wan Ngah et al., 2011). Both chitosan and guar gum have also free active functional groups such as -NH<sub>2</sub> and OH, which can be strongly interacted with metal ions, on the polymer backbone (Sharma et al., 2018; Zhang et al., 2016). These significant characteristics make chitosan and guar gum a desirable support material for catalytic reactions.

In this study, a novel highly thermally durable support material (CS-GG), which was composed from chitosan-guar gum microspheres, was designed and then palladium nanoparticles were successfully decorated on the prepared CS-GG. Chemical structures of the fabricated CS-GG and Pd NPs@CS-GG were illuminated by different analytical techniques. Then, catalytic behavior of Pd NPs@CS-GG was evaluated in the synthesis of a series of biaryl compounds. These tests revealed that Pd NPs@CS-GG catalyzed fabrication of biaryl compounds with good reaction yields in the solvent-free media. Furthermore, it was found that Pd NPs@CS-GG was easily recovered from the reaction media and it could be reused at least for seven successive runs.

## EXPERIMENTAL

### Synthesis of support material (CS-GG)

1 g of chitosan was dissolved in 2% acetic acid solution (v:v) and then 1 g of guar gum was added in the reaction mixture and it was stirred at room temperature for overnight. Resulting chitosan-guar gum mixture was dropped into solution of water:methanol:NaOH (40mL:60mL:12g) to obtain gelatinous microspheres. Subsequently, gelatinous chitosan-guar gum microspheres were extensively washed with water to neutrality. Finally, microspheres were transferred into the solution of glutaraldehyde (5 mL) in methanol (50 mL) and the mixture was stirred under reflux for 24 h for cross-linking. After the cross-linking procedure, chitosan-guar gum microspheres were filtered, washed with methanol and dried.



### Preparation of palladium nanoparticles on CS-GG

0.5 g of CS-GG was added to the solution of PdCl<sub>2</sub> (0.2 g, 20 mL) in ethanol and the reaction mixture was stirred at 70°C for 4 h to provide completely reduction of Pd(+2) to Pd(0). It was observed that the color of the reaction solution also changed to dark gray after this period. Finally, palladium nanoparticles were collected by filtration, rinsed with water and dried.

### Typical procedure for synthesis of biaryl compounds in the presence of Pd NPs@CS-GG

The mixture of aryl halides (1.0 mmol), phenylboronic acid (1.8 mmol), K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (3.5 mmol) and Pd NPs@CS-GG (3×10<sup>-2</sup> mmol) were placed in a Schlenk tube and then it was irradiated by microwave for 6 min. After the completion of the coupling reaction, 10 mL of water was added reaction mixture and then the resulting mixture was extracted with toluene. Subsequently, organic phase was dried over anhydrous MgSO<sub>4</sub>, and the solvent was evaporated to obtain biaryl compounds. Finally, characterizations of biaryls were performed by GC/MS.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Characterization of Pd NPs@CS-GG

Chemical structures of CS-GG microcapsules and Pd NPs@CS-GG were investigated by FT-IR analysis and their spectra are illustrated in Fig. 1. FTIR spectrum of CS-GG microcapsules displayed characteristic bands at 3365cm<sup>-1</sup> (stretching of N-H and OH), 2931 and 2870cm<sup>-1</sup> (stretching of C-H), 1559cm<sup>-1</sup> (amide II band of chitosan), 1372cm<sup>-1</sup> (stretching of NHCOCH<sub>3</sub> group), 1444 and 1022cm<sup>-1</sup> (stretching of C-O-C and C-C) (Baran et al., 2015; Seeli and Prabakaran, 2017). Additionally, a strongly band was observed at 1658cm<sup>-1</sup> which was attributed to imine vibrations. These results showed the formation of chitosan-guar microcapsules. On the other hand, it was observed that these characteristic bands shifted to lower or higher wavenumbers in the spectrum of Pd NPs@CS-GG. These important changes can be attributed to strongly interaction of CS-GG microcapsules with palladium nanoparticles.

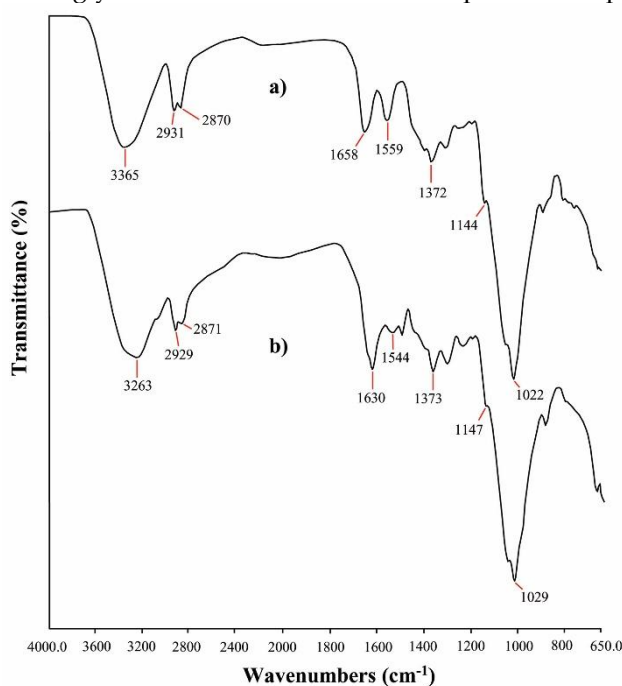
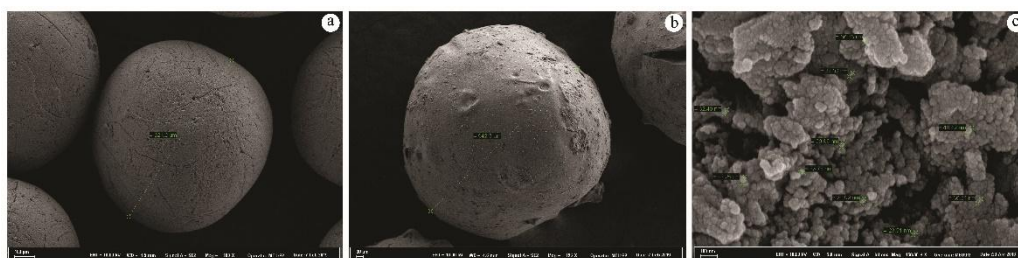


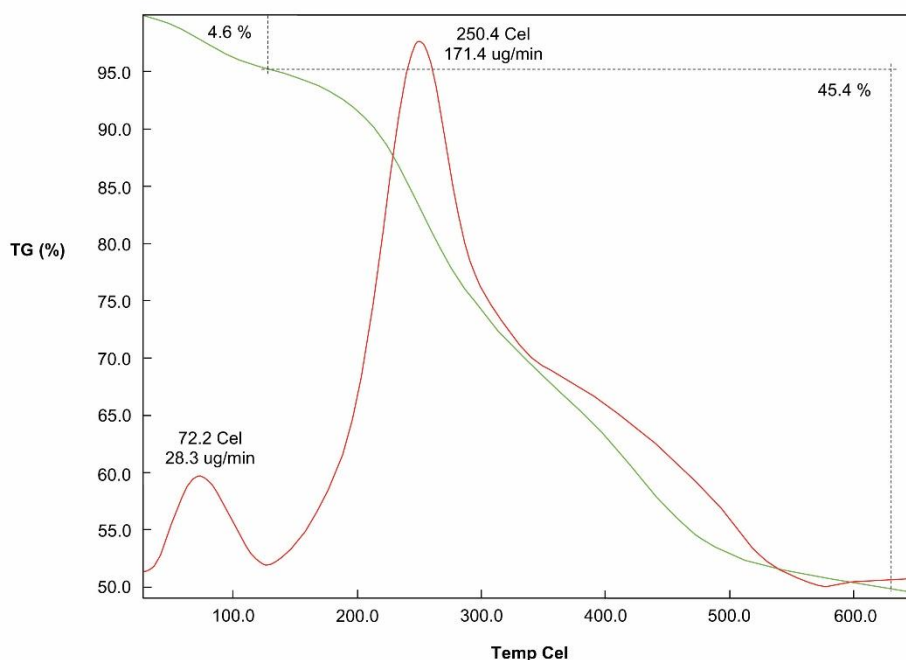
Figure 1. FT-IR spectra of a) CS-GG microcapsules and b) Pd NPs@CS-GG

Surface characteristics of CS-GG microcapsules and Pd NPs@CS-GG were studied by FE-SEM. As clearly shown in Fig. 2, CS-GG microcapsules and Pd NPs@CS-GG had spherical formation. While CS-GG microcapsules had nearly smooth surface (Fig. 2a), the surface of Pd NPs@CS-GG was covered with particles after the fabrication of palladium nanoparticles (Fig. 2b). Additionally, the surface morphology of Pd NPs@CS-GG was investigated at higher magnification to confirm the formation of nanoparticles (Fig. 2c). As seen in FE-SEM microgram of Pd NPs@CS-GG, palladium nanoparticles were successfully fabricated on the support and their average diameters were found to be between 23 and 48 nm.



**Figure 2.** FE-SEM images of a) CS-GG microcapsules and b) Pd NPs@CS-GG

Thermal durability of catalysts is one of the most important properties in catalytic systems to retain their catalytic performance. TG/DTG analysis was employed to determine thermal stability of Pd NPs@CS-GG and its curve is given in Fig. 3. When TG/DTG spectrum of Pd NPs@CS-GG was examined, it was found that Pd NPs@CS-GG had high thermal stability by protecting its chemical structure up to 250.4°C ( $T_{max}$ ). This results show that Pd NPs@CS-GG is a suitable catalyst for catalytic systems which require high reaction temperature.



**Figure 3.** TG/DTG spectrum of Pd NPs@CS-GG

XRD analysis was performed to illuminate the crystalline nature of Pd NPs@CS-GG and its pattern is given in Fig 4. When XRD diagram of Pd NPs@CS-GG was examined, a weak and broad peak at 21.64° was observed which corresponded to characteristic peaks of chitosan and guar gum (Baran et al., 2015; Seeli and Prabakaran, 2016). Pd NPs@CS-GG also exhibited strong two peaks at 40.18° and 46.68° which corresponded to (111) and (200) crystalline planes of Pd, respectively (Nasrollahzadeh and Sajadi, 2016). These results showed the presence of palladium nanoparticles on the CS-GG.

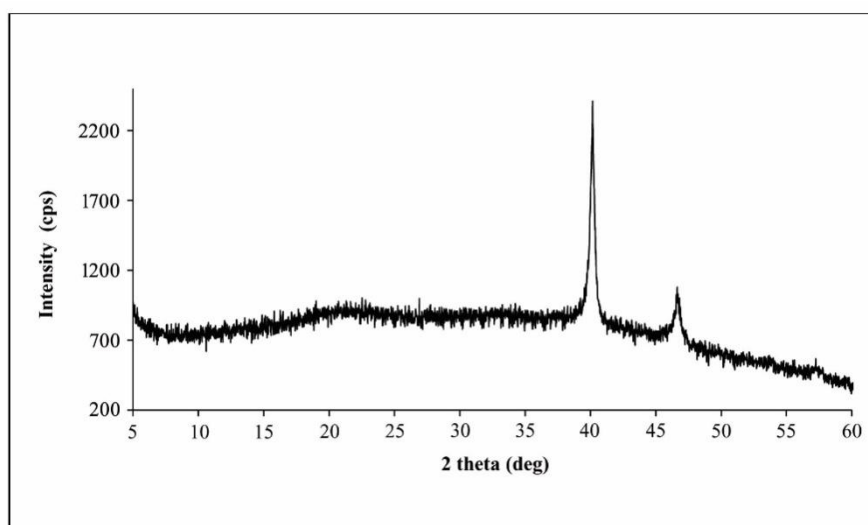
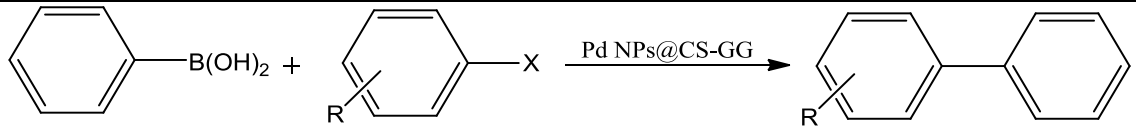


Figure 4. XRD pattern of Pd NPs@CS-GG

#### Microwave-assisted synthesis of biaryl compounds in the presence of Pd NPs@CS-GG

Synthesis of biaryl compounds were carried out using microwave heating because it offers (i) higher reaction yields with short reaction time and, (ii) easy and safe operation when compared to traditional heating methods. Additionally, in terms of green chemistry, no solvent was used in the catalytic reactions. Before catalytic tests of Pd NPs@CS-GG, determination of reaction conditions such as base type, reaction time and amount of catalyst require because they affect reaction yield. To optimize the reaction conditions, 4-iodide anisole and phenylboronic acid were chosen as model substrates and then preliminary studies were carried out. The best reaction yield was reached with  $K_2CO_3$  as base system, for 6 min reaction time and using  $3 \times 10^{-2}$  mmol amount of catalyst. Then, catalytic performance of Pd NPs@CS-GG was investigated against various Suzuki cross coupling reactions under the determined optimum conditions (Table 1). As seen in Table 1, catalytic activity of Pd NPs@CS-GG was studied in Suzuki cross coupling reactions of a range of aryl halides with phenylboronic acid. Firstly, coupling reactions of different substituted aryl iodides were performed in the presence of Pd NPs@CS-GG and the desired biaryl compounds were obtained with good reactions yields (Table 1, entries 1-4). For example, meta- $NO_2$  substituted aryl iodide afforded 94% yield (entry 2). At the next step, Pd NPs@CS-GG was also tested in the coupling reactions of a variety of aryl bromides and it was found that the yields of synthesized biaryl compounds were in the range from 70% to 98% (Table 1, entries 5-9). For example, the reaction of 4-bromobenzonitrile with phenylboronic acid produced the desired biaryl product with 98% yield. Finally, the substrates versatility of Pd NPs@CS-GG was also tested against aryl chlorides which are less reactive compared to aryl iodides and bromides in the coupling reactions (Table 1, entries 10-13). Pd NPs@CS-GG successfully catalyzed the conversion of aryl chloride to desired biaryl products. 76% and 82% reaction yields were reached for meta substituted- $NO_2$  and para substituted-CN aryl chlorides, respectively (Table 1, entries 11 and 12). The performed catalytic tests indicate that Pd NPs@CS-GG is a suitable catalyst for synthesis of biaryl compounds.

**Table 1.** Catalytic behavior of Pd NPs@CS-GG against synthesis of biaryls


| Entry | X  | R                  | Yield |
|-------|----|--------------------|-------|
| 1     | I  | 4-OCH <sub>3</sub> | 98    |
| 2     | I  | 3-NO <sub>2</sub>  | 94    |
| 3     | I  | 4-NH <sub>2</sub>  | 80    |
| 4     | I  | 4-CH <sub>3</sub>  | 78    |
| 5     | Br | 4-OCH <sub>3</sub> | 92    |
| 6     | Br | 4-NH <sub>2</sub>  | 77    |
| 7     | Br | 3-NO <sub>2</sub>  | 92    |
| 8     | Br | 4-CN               | 98    |
| 9     | Br | 4-CH <sub>3</sub>  | 70    |
| 10    | Cl | 4-OCH <sub>3</sub> | 69    |
| 11    | Cl | 3-NO <sub>2</sub>  | 76    |
| 12    | Cl | 4-CN               | 82    |
| 13    | Cl | 4-CH <sub>3</sub>  | 48    |

**Reaction conditions:** 1.8 mmol aryl halides, 1.2 mmol phenyl boronic acid, 3.5 mmol K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 3×10<sup>-2</sup> mmol Pd NPs@CS-GG, 6 min, 400 W.

### Reusability of Pd NPs@CS-GG

Highly reusable catalysts are desired for academic researches and industrial applications due to their economical and practical advantages (Baran et al., 2018). Therefore, in this study, reusability of Pd NPs@CS-GG was checked on the model reaction. After first cycle, Pd NPs@CS-GG was easily recovered with filtration from reaction media and it was rinsed with hot water, dried and then directly used for next runs. This process was repeated for each cycle. Reusability tests revealed that Pd NPs@CS-GG could be successfully reused seven times by giving 72% yield. This result shows that Pd NPs@CS-GG is a highly retrievable and reusable catalyst. FE-SEM analysis of the catalyst was performed after seven consecutive runs and it showed that the chemical structure of the catalyst was retained (Fig.5). Additionally, possible reaction mechanism of Suzuki coupling reaction using Pd NPs@CS-GG is given in Figure 6.

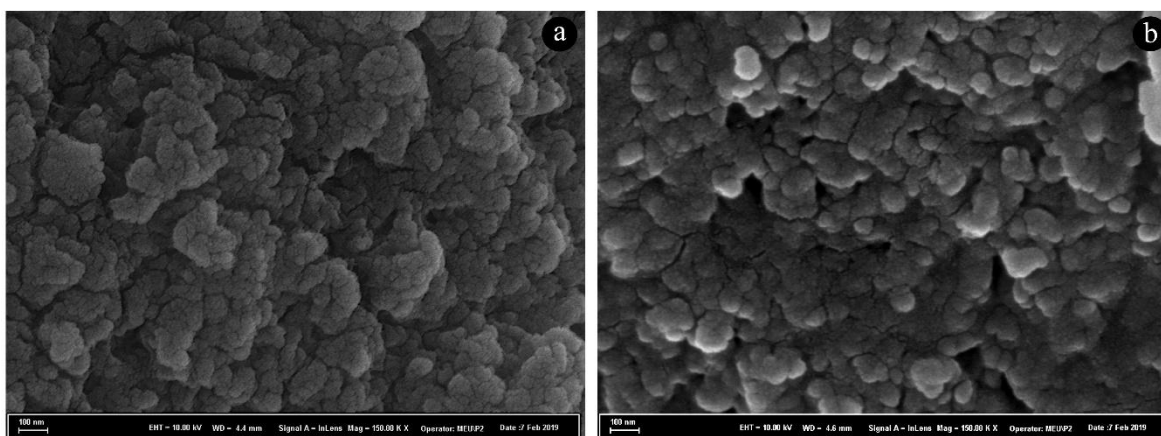


Figure 5. Surface morphologies of Pd NPs@CS-GG after a) 1th and b) 7th cycle

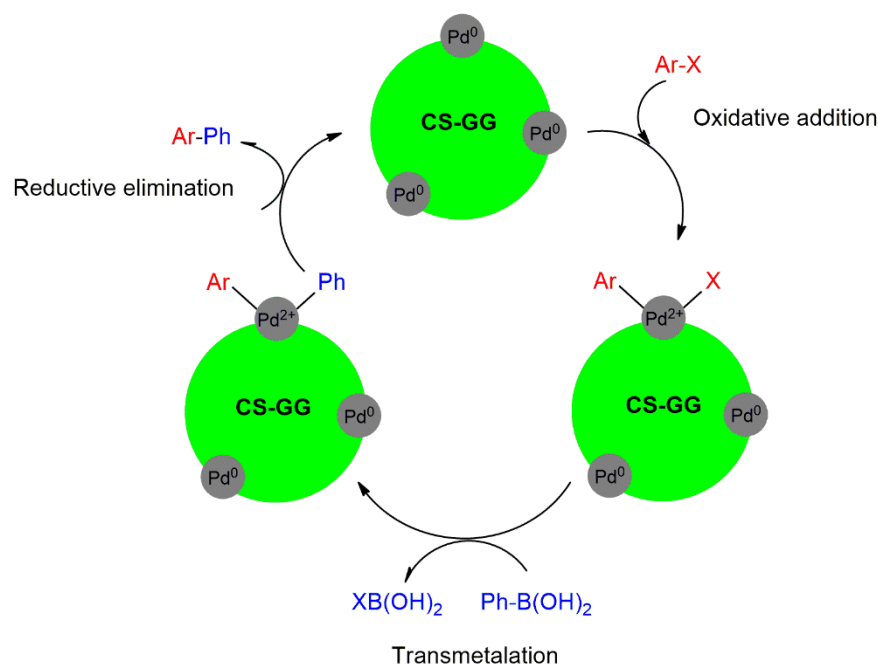


Figure 6. Possible mechanism of Suzuki coupling reaction using Pd NPs@CS-GG.

## CONCLUSIONS

In conclusion, Pd NPs@CS-GG was successfully designed, characterized and then it was used as heterogeneous catalyst for construction of several biaryl compounds. Catalytic studies showed that Pd NPs@CS-GG was a highly active catalyst which converted aryl iodides and bromides having variety of functionalized substrates to desired biaryl compounds with excellent yields. Pd NPs@CS-GG also served as a good catalyst for aryl chlorides. Furthermore, the prepared Pd NPs@CS-GG presented good recoverability and recyclability for at least seven runs. These findings indicate that Pd NPs@CS-GG is a useful catalyst for Suzuki cross coupling reactions.

## REFERENCES

Atarod, M., Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., 2016, "Euphorbia heterophylla leaf extract mediated green synthesis of Ag/TiO<sub>2</sub> nanocomposite and investigation of its excellent catalytic activity for reduction of variety of dyes in water", *Journal of Colloid and Interface Science*, 462, 272-279.

Baran, T., 2017, "Practical, economical, and eco-friendly starch-supported palladium catalyst for Suzuki coupling reactions" *Journal of colloid and interface science*, 496, 446-455.

Baran, T., Menteş, A., Arslan, H., 2015, "Synthesis and characterization of water soluble O-carboxymethyl chitosan Schiff bases and Cu(II) complexes", *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 94-103.

Baran, T., Sargin, İ., Kaya, M., Mulerčikas, P., Kazlauskaitė, S., Menteş, A., 2018, "Production of magnetically recoverable, thermally stable, bio-based catalyst: Remarkable turnover frequency and reusability in Suzuki coupling reaction", *Chemical Engineering Journal*, 331, 102-113.

Baskar, D., Kumar, T. S., 2009, "Effect of deacetylation time on the preparation, properties and swelling behavior of chitosan films", *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 767-772.

Chen, A., Ostrom, C., 2015, "Palladium-based nanomaterials: synthesis and electrochemical applications", *Chemical Reviews*, 115(21), 11999-12044.

Cui, X., Li, H., Yuan, M., Yang, J., Xu, D., Li, Z., Dong, Z., 2017, "Facile preparation of fluffy N-doped carbon modified with Ag nanoparticles as a highly active and reusable catalyst for catalytic reduction of nitroarenes", *Journal of Colloid and Interface Science*, 506, 524-531.

Daniel, M.-C., Astruc, D., 2004, "Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology", *Chemical Reviews*, 104(1), 293-346.

Gholinejad, M., Najera, C., Hamed, F., Seyedhamzeh, M., Bahrami, M., Kompany-Zareh, M., 2017, "Green synthesis of carbon quantum dots from vanillin for modification of magnetite nanoparticles and formation of palladium nanoparticles: Efficient catalyst for Suzuki reaction" *Tetrahedron*, 73(38), 5585-5592.

Mudgil, D., Barak, S., Khatkar, B. S., 2014, "Guar gum: processing, properties and food applications—A Review", *Journal of Food Science and Technology*, 51(3), 409-418.

Naghdi, S., Sajjadi, M., Nasrollahzadeh, M., Rhee, K. Y., Sajadi, S. M., Jaleh, B., 2018, "Cuscuta reflexa leaf extract mediated green synthesis of the Cu nanoparticles on graphene oxide/manganese dioxide nanocomposite and its catalytic activity toward reduction of nitroarenes and organic dyes", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 86, 158-173.

Nasrollahzadeh, M., Azarian, A., Maham, M., Ehsani, A., 2015, "Synthesis of Au/Pd bimetallic nanoparticles and their application in the Suzuki coupling reaction", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 746-748.

Nasrollahzadeh, M., Issaabadi, Z., Sajadi, S. M., 2019, "Green synthesis of Cu/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles as efficient and recyclable catalyst for reduction of 2,4-dinitrophenylhydrazine, Methylene blue and Congo red", *Composites Part B: Engineering*, 166, 112-119.

Nasrollahzadeh, M., Mehdipour, E., Maryami, M., 2018, "Efficient catalytic reduction of nitroarenes and organic dyes in water by synthesized Ag/diatomite nanocomposite using *Alocasia macrorrhiza* leaf extract", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(19), 17054-17066.

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., 2016, "Preparation of Pd/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles by use of *Euphorbia stracheyi* Boiss root extract: A magnetically recoverable catalyst for one-pot reductive amination of aldehydes at room temperature", *Journal of Colloid and Interface Science*, 464, 147-152.

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Rostami-Vartooni, A., Bagherzadeh, M., 2015, "Green synthesis of Pd/CuO nanoparticles by *Theobroma cacao* L. seeds extract and their catalytic performance for the reduction of 4-nitrophenol and phosphine-free Heck coupling reaction under aerobic conditions", *Journal of Colloid and Interface Science*, 448, 106-113.

Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Rostami-Vartooni, A., Bagherzadeh, M., Safari, R., 2015, "Immobilization of copper nanoparticles on perlite: Green synthesis, characterization and catalytic activity on aqueous reduction of 4-nitrophenol", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 400, 22-30.

Pal, S., Ghorai, S., Dash, M. K., Ghosh, S., Udayabhanu, G., 2011, "Flocculation properties of polyacrylamide grafted carboxymethyl guar gum (CMG-g-PAM) synthesised by conventional and microwave assisted method", *Journal of Hazardous materials*, 192(3), 1580-1588.

Phan, T. T. V., Hoang, G., Nguyen, V. T., Nguyen, T. P., Kim, H. H., Mondal, S., Junghwan, O., 2019, "Chitosan as a stabilizer and size-control agent for synthesis of porous flower-shaped palladium nanoparticles and their applications on photo-based therapies", *Carbohydrate Polymers*, 205, 340-352.

Rai, M., Yadav, A., Gade, A., 2009, "Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials", *Biotechnology advances*, 27(1), 76-83.

Rajender Reddy, K., Kumar, N. S., Surendra Reddy, P., Sreedhar, B., Lakshmi Kantam, M., 2006, "Cellulose supported palladium(0) catalyst for Heck and Sonogashira coupling reactions", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 252(1), 12-16.

Rathi, A. K., Gawande, M. B., Pechousek, J., Tucek, J., Aparicio, C., Petr, M., Varma, R. S., 2016, "Maghemite decorated with ultra-small palladium nanoparticles ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pd): applications in the Heck-Mizoroki olefination, Suzuki reaction and allylic oxidation of alkenes", *Green Chemistry*, 18(8), 2363-2373.

Seeli, D. S., Prabakaran, M., 2016, "Guar gum succinate as a carrier for colon-specific drug delivery", *International Journal of Biological Macromolecules*, 84, 10-15.

Seeli, D. S., Prabakaran, M., 2017, "Guar gum oleate-graft-poly(methacrylic acid) hydrogel as a colon-specific controlled drug delivery carrier", *Carbohydrate Polymers*, 158, 51-57.

Sharma, G., Sharma, S., Kumar, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., Naushad, M., Ghfar, A. A., Stadler, F. J., 2018, "Guar gum and its composites as potential materials for diverse applications: A review", *Carbohydrate Polymers*, 199, 534-545.

Sudhakar, P., Soni, H., 2018, "Catalytic reduction of Nitrophenols using silver nanoparticles-supported activated carbon derived from agro-waste", *Journal of environmental chemical engineering*, 6(1), 28-36.

Tajik, H., Moradi, M., Rohani, S., Erfani, A., Jalali, F., 2008, "Preparation of chitosan from brine shrimp (*Artemia urmiana*) cyst shells and effects of different chemical processing sequences on the physicochemical and functional properties of the product", *Molecules*, 13(6), 1263-1274.

Thombare, N., Jha, U., Mishra, S., Siddiqui, M. Z., 2016, "Guar gum as a promising starting material for diverse applications: A review", *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 361-372.

Veisi, H., Gholami, J., Ueda, H., Mohammadi, P., Noroozi, M., 2015, "Magnetically palladium catalyst stabilized by diaminoglyoxime-functionalized magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles as active and reusable catalyst for Suzuki coupling reactions", *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 396, 216-223.

Wan Ngah, W. S., Teong, L. C., Hanafiah, M. A. K. M., 2011, "Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review", *Carbohydrate Polymers*, 83(4), 1446-1456.

Xiang, R. Y., Lin, Y., Wai, C. M., 2003, "Decorating catalytic palladium nanoparticles on carbon nanotubes in supercritical carbon dioxide", *Chemical Communications*(5), 642-643.

Xue, S., Jiang, H., Zhong, Z., Low, Z.-X., Chen, R., Xing, W., 2016, "Palladium nanoparticles supported on a two-dimensional layered zeolitic imidazolate framework-L as an efficient size-selective catalyst", *Microporous and Mesoporous Materials*, 221, 220-227.

Zahed, B., Hosseini-Monfared, H., 2015, "A comparative study of silver-graphene oxide nanocomposites as a recyclable catalyst for the aerobic oxidation of benzyl alcohol: Support effect", *Applied Surface Science*, 328, 536-547.

Zhang, L., Zeng, Y., Cheng, Z., 2016, "Removal of heavy metal ions using chitosan and modified chitosan: A review", *Journal of Molecular Liquids*, 214, 175-191.



## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A NEW THE COMBINED POWER SYSTEM USING LNG'S COLD ENERGY

Dilek Nur ÖZEN

*Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Necmettin Erbakan University, Koycegiz Campus, 42140 Konya, TURKEY*  
[dnozen@erbakan.edu.tr](mailto:dnozen@erbakan.edu.tr)

(Geliş/Received: 05.05.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.07.2019)

**ABSTRACT:** In this study, a new combined power system was proposed for the Marmara Ereğlisi receiver terminal and the power generation during the evaporation of liquefied natural gas (LNG) was investigated. The combined power system consists of an open Brayton cycle (BC), a closed Rankine cycle (HRC) operating at high temperatures, and a closed Rankine cycle (LRC) operating at low temperatures. In the combined power system, an optimum value for the LRC condenser inlet pressure was found to be 150.7 kPa. The total power consumed, including LNG pumps in the system was found to be 193.413 MW and 291.321MW net power produced from the system.

**Key Words:** LNG, Cold Energy, Brayton Cycle, ORC, Combined Power Cycles

### LNG'nin Soğuk Enerjisini Kullanan Yeni Bir Birleşik Güç Sistemin Termodinamik Analizi

**ÖZ:** Bu çalışmada Marmara Ereğlisi alım terminali için yeni bir birleşik güç sistemi önerilmiştir ve sıvılaştırılmış doğalgazın (LNG) buharlaşması esnasındaki güç oluşumu araştırılmıştır. Birleşik güç sistemi bir açık Brayton çevrimi (BC), yüksek sıcaklıklarda çalışan bir kapalı Rankine çevrimi (HRC) ve düşük sıcaklıklarda çalışan bir kapalı Rankine çevriminden (LRC) oluşmaktadır. Bileşik güç sisteminde LRC kondenser giriş basıncı için optimum değer 150.7 kPa olarak bulunmuştur. Sistemdeki LNG pompaları da dahil harcanan toplam güç 193.413 MW ve sistemden üretilen net güç 291.321 MW olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** LNG, Cold Energy, Brayton Cycle, ORC, Combined Power Cycles

## INTRODUCTION

As energy consumption increases rapidly, energy resources are gradually decreasing. This situation makes saving measures and productivity applications compulsory in systems that produce or use energy. In recent years, work on power generation in LNG receiving terminals has been intensified. There are several studies in the literature which used the cold energy of LNG as heat sinks in combined power systems.

Yuanwei et al. (2011) have made the energy cycle based on the cold energy of liquefied natural gas analysis and optimization. They conducted a new analysis methodology that combines the energy level, and they determine the pinch analysis. Simulation results show that this new method of energy production was shown to be effective to improve the thermodynamic cycle. Shi and Chi (2009) have



worked in a combined power cycle that uses low-temperature waste heat and LNG cold energy. They proposed a combined power system in which low-temperature waste heat could be recovered efficiently and cold energy of liquefied natural gas (LNG) could also be fully utilized. The power output is equal to 1.25 MWh per kg ammonia-water mixture. For the operation of seawater pumps, approximately 0.2 MW of electrical power can be saved. Through simulation calculations, parametric analyzes are performed for the proposed combined cycle to evaluate the effects of key factors on the performance of the proposed combined cycle. The results show that as the inlet pressure of the ammonia turbine increases and the ammonia mass ratio increases, the maximum net electrical efficiency can be achieved when the peak value increases. Ghaebi et al. (2017) carried out energy, exergy and economic analysis of a new ammonia-water combined cooling and power cycle using waste heat as a low temperature heat source and LNG cold energy as thermal sink. They observed that higher ammonia concentrations could achieve a higher first law efficiency at heat source temperatures and at LNG turbine inlet pressures or at lower condenser temperatures and steam generator pressures, and could achieve a higher efficiency in lower ammonia concentrations, heat source temperatures and condenser temperatures at higher steam generator pressures, evaporator temperatures and LNG turbine inlet pressures. Behar et al. (2013) stated that LNG uses solar energy to increase the performance of the hybrid gas turbine. Compared to the non-cooled hybrid plant, the LNG cooling system increases the output of the solar gas turbine by 5% while increasing efficiency by 1%. Ersoy and Demirpolat (2016) investigated open and combined Rankine cycle power generation during evaporation of liquefied natural gas at Marmara Ereğlisi receiver terminal. For the combined Rankine cycle, they determined that the power required for LNG pumps used in the terminal could be met and beyond that, an additional 6.57 MW could be generated. Tan et al. (2016) conducted an experimental study on self-cooling automatic air conditioning system based on LNG fuel trucks. They indicate that the self-cooling air conditioning system for LNG fueled trucks is feasible and that the cooling capacity storage methods should be used to adjust the cold supply due to the fluctuation of LNG consumption rate and the mismatch of the demand. Bao et al. (2017) presented the effects of progressive condensation on power generation systems for LNG cold energy recovery. When the net power output was objective, the net power output of the three-stage combined cycle was the largest. Kanbur et al. (2017) has made thermo-economic and environmental assessments of a combined cycle for the use of small-scale LNG cold. They found that the single system has a 25% lower level of product cost than the combined system at the actual pressure ratio. A simple graphical based thermoeconomic optimization study shows that the minimum relative cost differences are in different locations for the combined cycle. Franco and Casarosa (2015) carried out the thermodynamic analysis of direct expansion configurations for electricity generation with LNG cold energy recovery. Using a direct expansion configuration with a multi-stage turbine, in which they apply a simplified thermodynamic model, it shows that the energy production values typical for optimized ORC plant configurations (120 kJ per kg of natural gas flowing through the plant) can be obtained. The development of a direct expansion plant with a multi-stage turbine and an internal heat recovery system can allow for closer to 160 kJ of production for each kg of flowing liquefied natural gas. Considering the mass flow rate values typical of LNG gas stations (eg 70 kg / h); this corresponds to an output power of 8.3 MW to 11.4 MW.

Turkey are among the countries that imported LNG. Turkey, which supplies natural gas needs from foreign markets, LNG is observed that its importance increases with each passing day. Its two gasification LNG receiving terminal that has been raised in Turkey's recent investment in a new terminal. The increasing use of LNG makes it important for our country to work on saving and recovering the cold energy of LNG. In this study, a combined power system for a LNG receiving terminal in Turkey are proposed. The purpose of a combined power system is to utilize the cold energy of liquefied natural gas. The proposed power system contributes both to energy saving and to the environment. The combined power system consists of open Brayton cycle, two closed Rankine cycles.



**Table 1.** Main parameters for the calculations

| Parameters   | Value                       |
|--|-----------------------------|
| Working fluid and mass flow rate (kg/s)(Ersoy and Demirpolat, 2016)                                  | CH <sub>4</sub> ,<br>160.28 |
| LNG reservoir pressure and LNG Pump1 inlet pressure P <sub>1</sub> (kPa)(Ersoy and Demirpolat, 2016) | 105                         |
| LNG reservoir temperature T <sub>1</sub> (K)(Ersoy and Demirpolat, 2016)                             | 112                         |
| LNG Pump2 inlet pressure P <sub>2</sub> (kPa) (Ersoy and Demirpolat, 2016)                           | 1000                        |
| Natural gas delivery pressure P <sub>4,5,6</sub> (Ersoy and Demirpolat, 2016)                        | 8200                        |
| Natural gas delivery temperature T <sub>4,5,6</sub> (Ersoy and Demirpolat, 2016)                     | 273                         |
| Isentropic efficiency of the gas-turbine, $\eta_{tr,Br}$ (Akbari, 2018)                              | 0.85                        |
| Isentropic efficiency of the compressor, $\eta_{c,Br}$ (Hou et al.,2018)                             | 0.8                         |
| Isentropic efficiency of the steam-turbine, $\eta_{tr,HRC}$ $\eta_{tr,Br}$ (Akbari, 2018)            | 0.85                        |
| Isentropic efficiency of the R718-turbine, $\eta_{tr,LRC}$ $\eta_{tr,Br}$ (Akbari, 2018)             | 0.75                        |
| Mass flow rate of air, $m_{air}^g$ (kg/s)  | 430                         |
| Pressure rate of compressor, $r_p$   | 15                          |
| Compressor inlet pressure P <sub>11</sub> (kPa)  | 100                         |
| Compressor inlet temperature T <sub>11</sub> (K)   | 298                         |
| Steam-turbine inlet pressure P <sub>18</sub> (kPa)   | 22052                       |
| Boiler output temperature T <sub>18</sub> (K)  | 763                         |
| Steam-Condenser pressure P <sub>19</sub> (kPa)   | 150.7                       |
| Combustion, $\eta_c$   | 0.85                        |

The following assumptions are made for the combined power system analysis:

- The flow is considered to be a steady-state. At no point in the system it is assumed that properties of the flow have not changed over time
- The pressure and heat losses in the system components are ignored.
- LNG is considered to be pure methane (Ersoy and Demirpolat , 2016)
- All components are insulated.
- It has been accepted that the Brayton cycle is performed with 50% excess air.

### LNG Reservoir and LRC

In the LNG receiving terminals, heat transfer is required with a high temperature heat source to convert liquefied natural gas into natural gas. Similarly, in a combined power cycle, heat transfer is required with a low temperature heat source to condense the circulating steam and to cool the cycle

members. The condensation of the vapor in the proposed combined power system and the conversion of the liquefied natural gas to natural gas will be carried out by the LRC.

The pressure of the LNG at a low temperature of  $-161^{\circ}\text{C}$  taken from the storage tank is increased by the two LNG pumps. The pressure of the LNG leaving the second pump ( $P_2$ ) corresponds to the pressure of the natural gas in the consumer line. The required pump works are given in the following equations.

$$\dot{W}_{LNG,P1} = \dot{m}_{LNG} \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

$$\dot{W}_{LNG,P2} = \dot{m}_{LNG} \cdot (h_3 - h_2) \quad (2)$$

where

$$h_2 = h_1 + w_{LNG,P1} \quad (3)$$

where

$$w_{LNG,P1} = v_1 \cdot (P_2 - P_1) \quad (4)$$

where

$$h_3 = h_2 + w_{LNG,P2} \quad (5)$$

where

$$w_{LNG,P2} = v_2 \cdot (P_3 - P_2) \quad (6)$$

The pressurized LNG is converted to the gas phase by taking heat from the condenser in the LRC.

The condenser heat ( $\dot{Q}_{3,4}$ ) is given by

$$\dot{Q}_{3,4} = \dot{m}_{LNG} \cdot (h_4 - h_3) \quad (7)$$

The pump and turbine powers in the LRC are calculated by the following equations respectively.

$$\dot{W}_{p,LRC} = \dot{m}_{LRC} \cdot (h_9 - h_8) \quad (8)$$

$$\dot{W}_{tr,LRC} = \dot{m}_{LRC} \cdot (h_{10} - h_7) \quad (9)$$

where

$$h_7 = h_{10} - \eta_{tr,LRC} \cdot (h_{10} - h_{7s}) \quad (10)$$

$$\dot{m}_{LRC} = \frac{\dot{Q}_{3,4}}{(h_7 - h_8)}$$

$$(11) \quad h_9 = h_{10} - \frac{\dot{Q}_{19,20}}{\dot{m}_{LRC}} \quad (12)$$

The heat ( $\dot{Q}_{18,19}$ ) from the condenser of the closed Rankine cycle passes to the evaporator of the LRC. This heat is found by the following equation.

$$\dot{Q}_{19,20} = \dot{W}_{tr,LRC} + \dot{Q}_{3,4} - \dot{W}_{p,LRC} \quad (13)$$

### Open Brayton Cycle

In this cycle, the ambient air compressor enters and pressurizes. The pressurized air enters the combustion chamber; the air is heated by the combustion of the fuel. The pressurized and heated air is energized and extended across the turbine and work is obtained. The turbine and compressor power in the Brayton cycle is given by the following equations respectively.

$$\dot{W}_{comp} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{12} - h_{11}) \quad (14)$$

$$\dot{W}_{tr,gas} = \dot{m}_T \cdot (h_{13} - h_{14}) \quad (15)$$

where

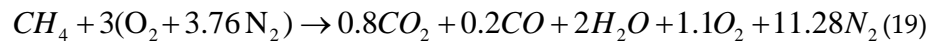
$$h_{12} = h_{11} + \frac{(h_{12s} - h_{11})}{\eta_{c,Br}} \quad (16)$$

$$h_{14} = h_{13} - \eta_{tr,Br} \cdot (h_{13} - h_{14s}) \quad (17)$$

$\dot{m}_T$  is the total mass of combustion products and is given by the following equation.

$$\dot{m}_T = \dot{m}_{air} + \dot{m}_{fuel} \quad (18)$$

The fuel in the combustion chamber is assumed to burn with 50% excess air. According to this, the amount of fuel ( $\dot{m}_{fuel}$ ) is found by combustion reaction of methane gas.



The heat value of the fuel is found by the following equation.

$$\dot{Q}_c = nM_{CH_4} (h_{fCH_4} + h_{CH_4} - h_{0CH_4}) + 3nM_{O_2} (h_{O_2} - h_{0O_2}) + 11.28nM_{N_2} (h_{N_2} - h_{0N_2}) - \left[ 0.8nM_{CO_2} (h_{fCO_2} + h_{CO_2} - h_{0CO_2}) + 2nM_{H_2O} (h_{fH_2O} + h_{H_2O} - h_{0H_2O}) + 11.28nM_{N_2} (h_{N_2} - h_{0N_2}) + 0.2nM_{CO} (h_{fCO} + h_{CO} - h_{0CO}) + 1.1nM_{O_2} (h_{O_2} - h_{0O_2}) \right] \quad (20)$$

The heat received ( $\dot{Q}_{cc}$ ) by the combustion products is found by the following equation. The combustion efficiency was considered as 90%.

$$\dot{Q}_{cc} = \dot{Q}_c \cdot \eta_c \quad (21)$$

### High Temperature Closed Rankine Cycle

In the Brayton cycle, the heat of the exhaust gases from the turbine was used as heat source for the Rankine cycle. The pump and turbine powers in the Rankine cycle are given by the following equations respectively.

$$\dot{W}_{p,HRC} = \dot{m}_{HRC} \cdot (h_{17} - h_{20}) \quad (22)$$

$$\dot{W}_{tr,HRC} = \dot{m}_{HRC} \cdot (h_{18} - h_{19}) \quad (23)$$

where

$$h_{17} = h_{20} + w_{p,HRC} \quad (24)$$

where

$$w_{p,HRC} = v_{20} \cdot (P_{20} - P_{17}) \quad (25)$$

$$h_{19} = h_{18} - \eta_{tr,HRC} \cdot (h_{18} - h_{19s}) \quad (26)$$

$$\dot{m}_{HRC} = \frac{\dot{Q}_{19,20}}{(h_{19} - h_{20})} \quad (27)$$

### The efficiency of the combined power system

The net power and efficiency obtained from the combined power system are given by the following equations respectively.

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{tr,HRC} + \dot{W}_{tr,LRC} + \dot{W}_{tr,Br} - (\dot{W}_{LNG,P1} + \dot{W}_{LNG,P2} + \dot{W}_{p,LRC} + \dot{W}_{p,HRC} + \dot{W}_{comp}) \quad (28)$$

$$\eta_{cycle} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{cc}} 100 \quad (29)$$

### RESULTS AND DISCUSSION

The performance of the above-mentioned combined power system under the optimum operating condition is summarized in Table 2.

**Table 2.** Calculation results for the combined power cycle.

| $\dot{W}_{tr,gas}$<br>(kW) | $\dot{W}_{tr,HRC}$<br>(kW) | $\dot{W}_{tr,LRC}$<br>(kW) | $\dot{W}_{comp}$<br>(kW) | $\dot{W}_{pump,total}$<br>(kW) | $\dot{W}_{net}$<br>(kW) | $\eta_{cycle}$<br>% |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 415687                     | 45863                      | 23184                      | 189948                   | 3465                           | 291321                  | 46.105              |

In the LRC, R718 was selected as the working fluid in particular. Because R718 absorbs a considerably larger amount of energy in the form of heat during a phase change of the liquid without changing the temperature. The high latent heat of evaporation of the R718 refrigerant ensures high heat at low temperatures and mass flow.

Due to this feature of the R718 refrigerant, it is aimed to increase the heat source of the LRC by increasing the condenser pressure in the closed Rankine cycle.

As expected in the HRC cycle, increasing the condenser pressure reduced the turbine power obtained from this cycle as the turbine pressure difference decreased, as shown in Fig.2. Turbine power was increased in this cycle because increasing the condenser pressure provided a higher heat source for the LRC (Fig. 3).

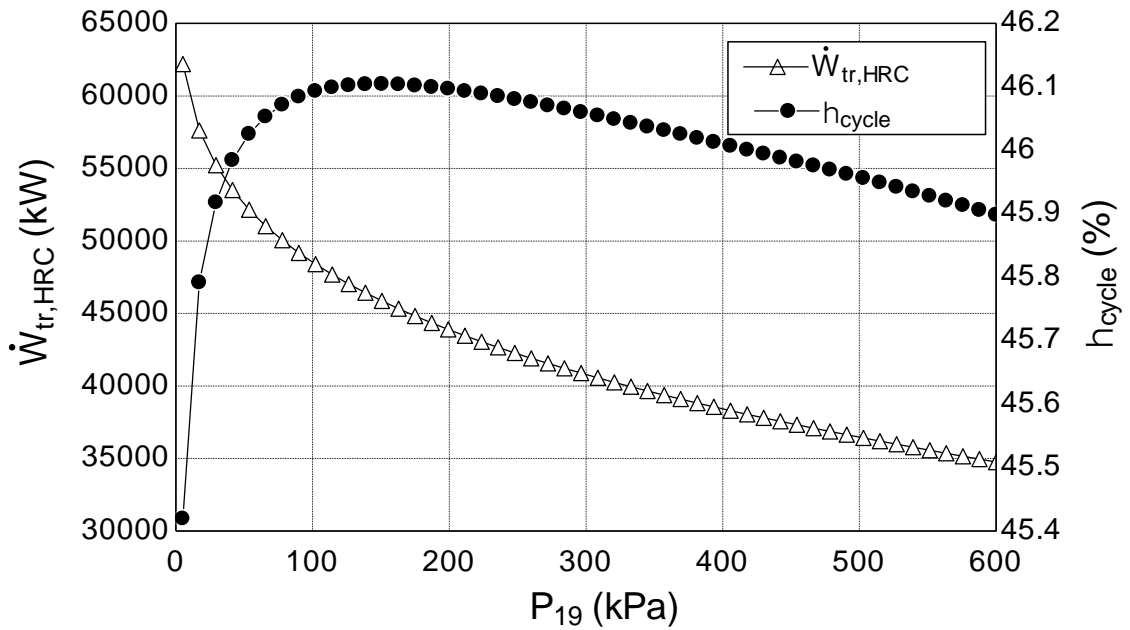


Figure 2. Effects of Rankine cycle-condenser pressure in combined power system on HRC turbine power and thermal efficiency

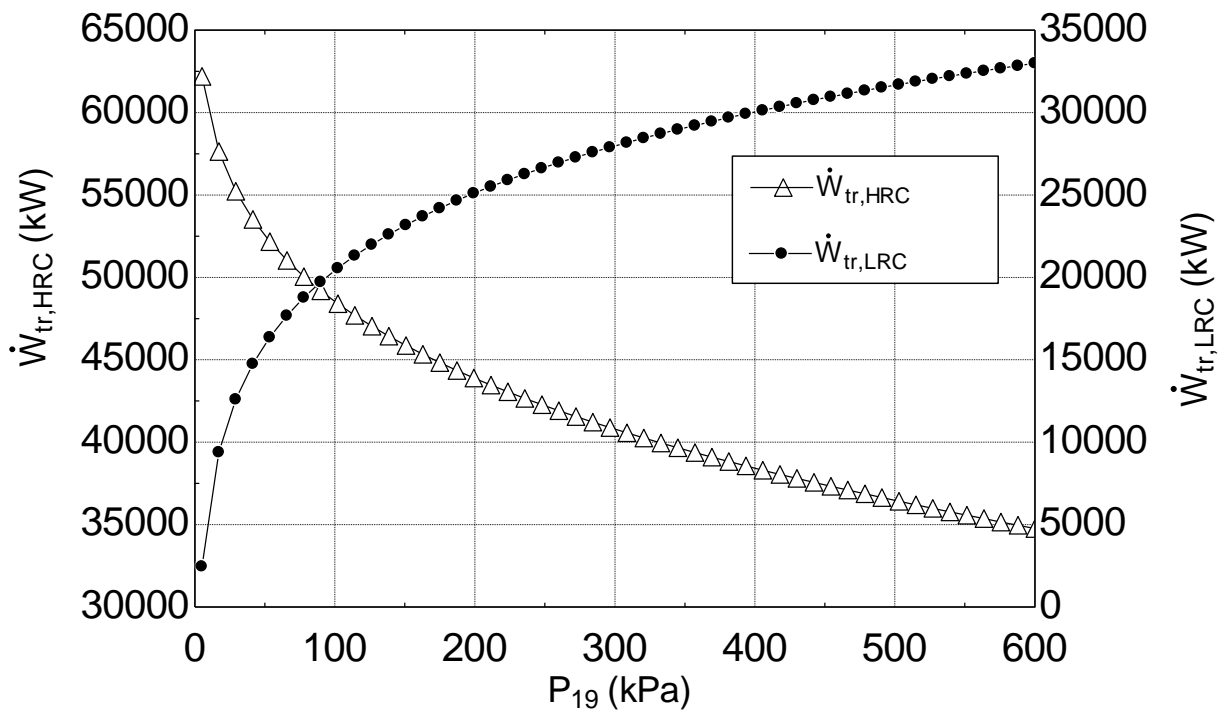


Figure 3. Effects of Rankine cycle-condenser pressure in combined power system on steam-turbine power and R718-turbine power

As shown in Fig.4, the efficiency of the cycle increased initially and then began to decrease. This is due to the fact that the efficiency of the system has increased since the power increase of the turbine in the LRC cycle was more than the power decrease of the turbine in the HRC cycle. After a certain point, the power reduction of the turbine in the HRC cycle begins to overcome the power increase of the turbine in the LRC cycle. This has led to a reduction in net power in the system and thus a decrease in the efficiency of the system (Fig.5).The increase in condenser pressure has also increased the steam quality in the last stages of the turbine. This will cause the liquid particles in the vapor to decrease and

thus increase the turbine efficiency and lifetime. As the condenser pressure increases, the efficiency of the combined power system increases at the beginning and then decreases. The cycling efficiency starts to decrease after the 150.7 kPa condenser pressure value. Therefore, this value is the optimum condenser pressure value in closed Rankine cycle.

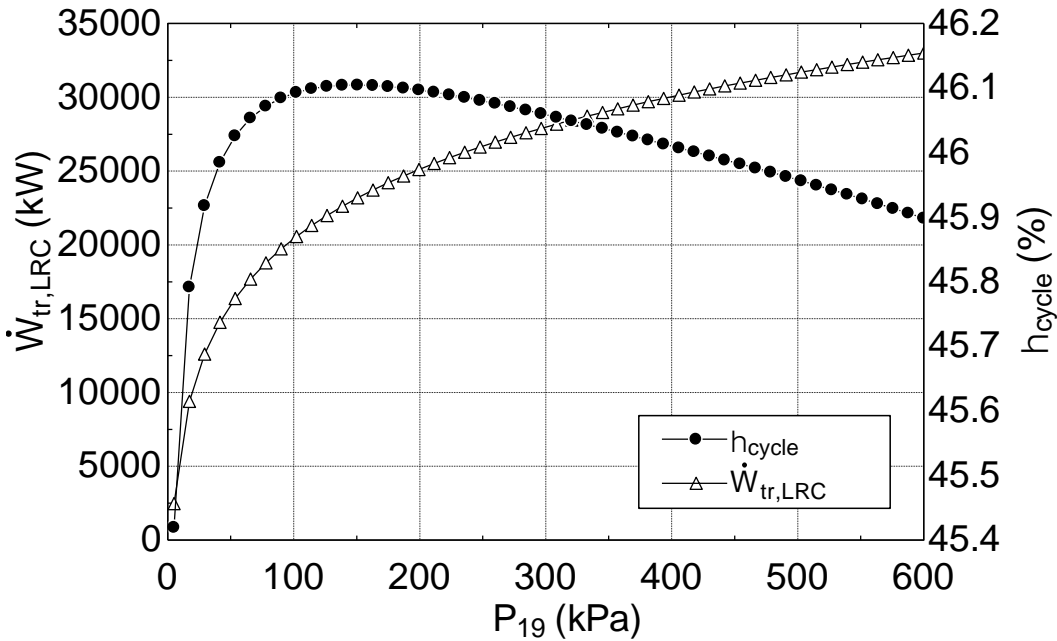


Figure 4. Effects of Rankine cycle-condenser pressure in combined power system on R718-turbine power and thermal efficiency

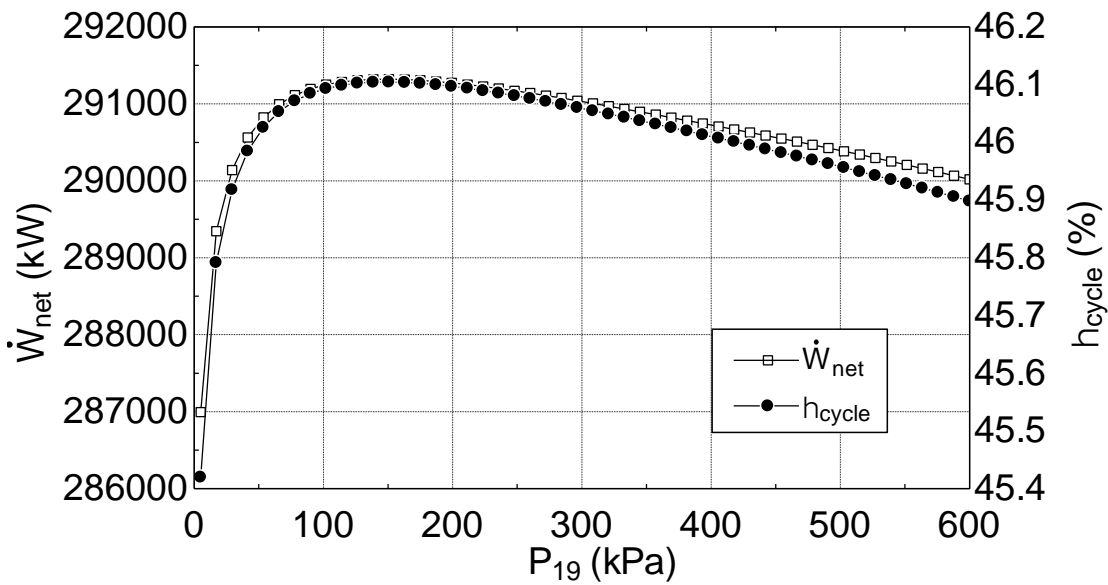


Figure 5. Effects of Rankine cycle-condenser pressure in combined power system on net power and thermal efficiency



In Fig. 6 only the efficiency of the system with BC ( $\eta_{Br}$ ), BC and HRC with the efficiency of the system ( $\eta_{Br,HRC}$ ) and BC, HRC and LRC with the efficiency of the combined system ( $\eta_{cycle}$ ) is shown. The addition of HRC and LRC cycles to the Brayton cycle increased the efficiency of the system by 34%.The efficiency evaluation is made specifically for the Brayton cycle because the heat source of the combined power system is obtained from the combustion chamber of this cycle.

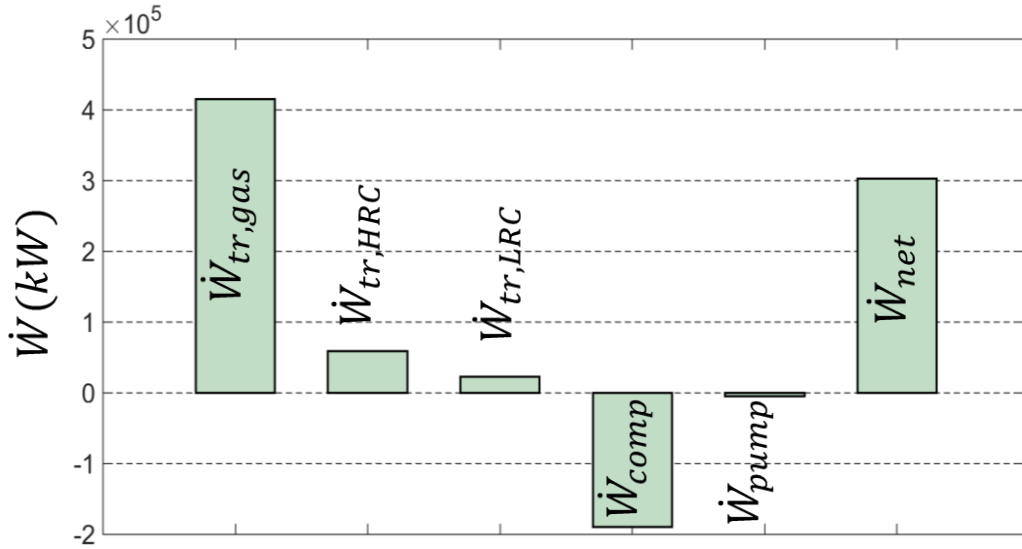


Figure 6. The thermal efficiencies of the cycles in the combined power system

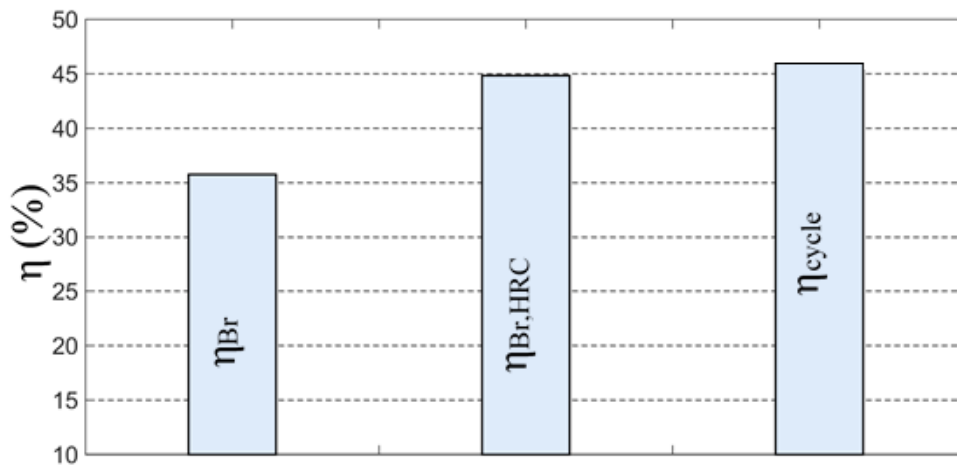
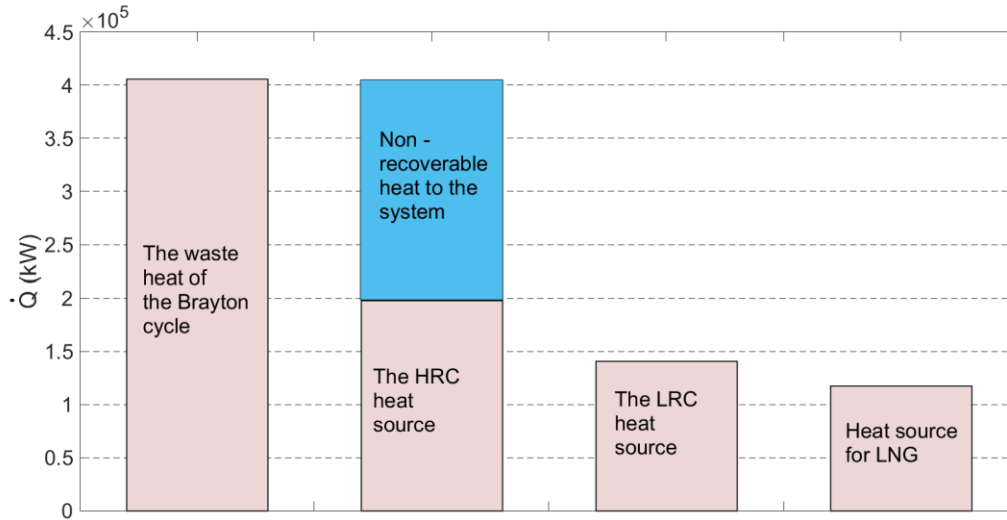


Figure 7. The powers of the cycles in the combined power system



**Figure 8.** The heat source and waste heat of the cycles in the combined power system

Fig.7 shows the turbine powers of BC, HRC and LRC cycles ( $\dot{W}_{tr,gas}$ ,  $\dot{W}_{tr,HRC}$ ,  $\dot{W}_{tr,LRC}$ ), the compressor and pump power ( $\dot{W}_{comp}$ ,  $\dot{W}_{pump}$ ) used in the system and the net power ( $\dot{W}_{net}$ ) obtained from the system. As shown in Fig.7, the maximum power from the composite system was obtained from the BC cycle and then from the HRC and LRC cycles, respectively. The power required for LNG pumps can be provided by using 13% of the power obtained by using only the LRC.

The heat drawn from the Brayton cycle is 406.130 MW. By adding the HRC, the heat from the cycle was 140.621 MW. With the addition of the LRC this value has decreased to 117.438 MW. As shown in Fig. 8, waste heat is utilized by the cycle integration and the amount of heat exhausted from the system is reduced. As a result, some of the waste heat of the Brayton cycle is recycled to the system. This value is 198.061 MW. Because, in the LRC, the heat taken from the condenser turns the LNG into the gas phase and this energy is also utilized.

## CONCLUSION

This paper is investigated the applicability of the combined power system for a LNG receiving terminal in Turkey. With the proposed combined power system, it is aimed to utilize the cold energy of LNG and waste heat from low temperature. A mathematical model was developed for the combined power system and calculations were made in the EES computer program. The following results were obtained in the study.

- The net power obtained from the combined power system is 291.321MW and the efficiency of cycle is 46.105%
- There is an optimum point in the condenser pressure in the closed Rankine cycle for the combined power system. This value is 150.7 kPa, and after this value increase of the pressure decreases the efficiency of the cycle.
- The power required for LNG pumps is 13% of the power obtained from only the LRC.

## NOMENCLATURE

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| $h$       | specific enthalpy (kJ/kg)             |
| $h_f$     | formation specific enthalpy (kJ/kmol) |
| HRC       | high temperature Rankine cycle        |
| $\dot{m}$ | mass flow rate (kg/s)                 |
| $n$       | mole (kmol)                           |
| LRC       | low temperature Rankine cycle         |

|           |   |
|-----------|---|
| $r_p$     | pressure ratio                                |
| $\dot{Q}$ | heat transfer rate (kW)                       |
| T         | temperature (K)                               |
| $\dot{W}$ | produced or consumed power by components (kW) |

**Greek letters**

|          |                       |
|----------|-----------------------|
| $\eta$   | efficiency            |
| $\eta_c$ | combustion efficiency |

**Subscripts**

|        |                             |
|--------|-----------------------------|
| Br     | Brayton cycle               |
| c,Br   | compressor of Brayton cycle |
| comp   | compressor                  |
| F      | fuel                        |
| p      | pump                        |
| P      | product                     |
| tur    | turbine                     |
| tr,Br  | turbine of Brayton cycle    |
| tr,LRC | turbine of LRC              |
| tr,HRC | turbine of HRC              |

**REFERENCES**

- Akbari, N., 2018, Introducing and 3E (energy, exergy, economic) analysis of an integrated transcritical CO<sub>2</sub> Rankine cycle, Stirling power cycle and LNG regasification process. *Applied Thermal Engineering*, 140, 442-454.
- Bao, J., Lin, Y., Zhang, R., Zhang, N., & He, G., 2017, Effects of stage number of condensing process on the power generation systems for LNG cold energy recovery, *Applied Thermal Engineering*, 126, 566-582.
- Badami, M., Bruno, J. C., Coronas, A., & Fambri, G., 2018, Analysis of different combined cycles and working fluids for LNG exergy recovery during regasification. *Energy*, 159, 373-384.
- Behar, O., Khellaf, A., Mohammedi, K., & Ait-Kaci, S. Enhancing the performance of solar hybrid gas turbine using LNG cold energy.
- Cao, Y., Rattner, A. S., & Dai, Y., 2018, Thermo economic analysis of a gas turbine and cascaded CO<sub>2</sub> combined cycle using thermal oil as an intermediate heat-transfer fluid. *Energy*, 162, 1253-1268.
- Choi I-H, et al., 2013, Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery. *Energy*, 61:179-95.
- Ersoy, H. K., & Demirpolat, S. O., 2009, Using liquefied natural gas cold energy for power generation: case study for Marmara Ereğlisi receiving terminal, *Journal of the Energy Institute*, 82(1), 11-18.
- Ghaebi, H., Parikhani, T., & Rostamzadeh, H., 2017, Energy, exergy and thermo economic analysis of a novel combined cooling and power system using low-temperature heat source and LNG cold energy recovery, *Energy Conversion and Management*, 150, 678-692.
- Gómez, M. R., Garcia, R. F., Carril, J. C., & Gómez, J. R., 2014, High efficiency power plant with liquefied natural gas cold energy utilization. *Journal of the Energy Institute*, 87(1), 59-68.
- Hou, S., Zhou, Y., Yu, L., Zhang, F., & Cao, S., 2018, Optimization of the combined supercritical CO<sub>2</sub> cycle and organic Rankine cycle using zeotropic mixtures for gas turbine waste heat recovery. *Energy conversion and management*, 160, 313-325.
- Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F., 2017, Thermo economic and environmental assessments of a combined cycle for the small scale LNG cold utilization, *Applied Energy*, 204, 1148-1162.
- Khaljani, M., Saray, R. K., & Bahlouli, K., 2015, Comprehensive analysis of energy, exergy and exergo-economic of cogeneration of heat and power in a combined gas turbine and organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, 97, 154-165.

Kim KH, Kim KC., 2014, Thermodynamic performance analysis of a combined power cycle using low grade heat source and LNG cold energy. *Appl Therm Eng*, 70:50–60.

Lee S., 2017, Multi-parameter optimization of cold energy recovery in cascade Rankine cycle for LNG regasification using genetic algorithm. *Energy*, 118:776–82.

Li P, et al., 2016, A cascade organic Rankine cycle power generation system using hybrid solar energy and liquefied natural gas. *Sol Energy*, 127:136–46.

Lu T, Wang K., 2009, Analysis and optimization of a cascading power cycle with liquefied natural gas (LNG) cold energy recovery. *Appl Therm Eng*, 29(8):1478–84.

Mosaffa A, Mokarram NH, Farshi LG., 2017, Thermo-economic analysis of combined different ORCs geothermal power plants and LNG cold energy. *Geothermics*, 65:113–25.

Nami, H., Mahmoudi, S. M. S., & Nemati, A., 2017, Exergy, economic and environmental impact assessment and optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a supercritical CO<sub>2</sub> and an organic Rankine cycle (GT-HRSG/SCO<sub>2</sub>). *Applied Thermal Engineering*; 110, 1315-1330.

Shi, X., & Che, D., 2009, A combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy. *Energy conversion and management*, 50(3), 567-575.

Song Y, et al., 2012, Thermodynamic analysis of a transcritical CO<sub>2</sub> power cycle driven by solar energy with liquified natural gas as its heat sink. *Appl Energy*, 92:194–203.

Tan, H., Sun, N., Lin, C., & Li, Y., 2016, Experimental study on a self-refrigerated auto air conditioning system based on LNG-fuelled trucks, In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2016 IEEE 11th Conference on* (pp. 1586-1591). IEEE.

Wang H, Shi X, Che D., 2013, Thermodynamic optimization of the operating parameters for a combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy. *Appl Therm Eng*, 59:490–7.

Yuanwei, L., Hongchang, Y., & Chongfang, M., 2011, Analysis and optimization of the power cycle based on the cold energy of liquefied natural gas. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2011 Third International Conference on* (Vol. 1, pp. 455-458). IEEE.

Zhang G, Xu W, Yang Y, Zhang D., 2014, Utilization of LNG cryogenic energy in a proposed method for inlet air cooling to improve the performance of a combined cycle. *Energy Proc*, 61:2109–13.

Zhang G, Zheng J, Yang Y, Liu W., 2016, A novel LNG cryogenic energy utilization method for inlet air cooling to improve the performance of combined cycle. *Appl Energy*, 179:638–49.

Zhao P, Wang JF, Dai Y, Gao L., 2015, Thermodynamic analysis of a hybrid energy system based on CAES system and CO<sub>2</sub> transcritical power cycle with LNG cold energy utilization. *Appl Therm Eng*, 91:718–30.



## ZAYIF KAYA MALZEMELERİNİN YERİNDE DAYANIMININ BELİRLENMESİNDE İNDEKS DENEYLERİN KULLANIMI İLE İLGİLİ BİR YAKLAŞIM

<sup>1</sup>İhsan ÖZKAN , <sup>2</sup>Meriç KAYA 

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya,  
TURKIYE*

<sup>1</sup>iozkan@ktun.edu.tr, <sup>2</sup>kayameric@hotmail.com

(Geliş/Received: 14.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 19.07.2019)

**ÖZ:** Bu çalışma, TKİ-GLİ-Ömerler yeraltı maden ocağında hazırlık çalışmalarının yürütüldüğü A6 uzunayak panosunda gerçekleştirilmiştir. Kalın kömür damarı tabanında konumlanan zayıf ve tabakalı kiltası dayanımının belirlenmesi hedeflenmiştir. A6 panosuna ait nakliye galeri arını ve uzunayak kazı arını olacak kılavuz galeri arınında kiltası kaya birimi ile karşılaşılmıştır. Yerinde büyük ölçekli kazı arınlarında Schmidt sertlik (SH) ve nokta yükleme dayanımı (NYD) indeks deneylerinin yapılması planlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, 9 adet kazı arınında SH deneyleri, 3 adetinde ise NYD indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 66,75 m<sup>2</sup> olan deney bölgeleri, kendi içlerinde herbiri 0,25 m<sup>2</sup> olacak şekilde 267 birim ölçüm hücresine bölünmüştür. Birim hücrelerin orta noktasında en az üç kez tekrarlanmak kaydı ile SH deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, aynı birim hücrelerden alınan üç adet düzensiz örnek üzerinde NYD indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ölçekte deneylere yönelik öneriler veren ISRM (2007) ve ASTM (1993), saha uygulamalarının nasıl yapılacağı konusunda açık bir öneri vermemektedir. Karşılaşılan bu sorunun aşılmasına yönelik çalışmalar bu makalede sunulmuştur. Bu çalışmada, toplam 801 adet SH deney sonucu ve aynı zamanda gerçekleştirilen 336 adet NYD indeks deney sonucu birlikte değerlendirilmiştir. Sonuç olarak yapılan analizler ışığında; (i) optimum deney sonucunu verecek deney alanı büyüklükleri ve birim ölçüm hücre adetleri belirlenmiştir, (ii) deney sonuçları arasındaki mekanik ilişkiler incelenmiştir, ve (iii) indeks deney sonuçlarına dayalı önerilen amprik yaklaşımlar kullanılarak, tek eksenli basma dayanımı (TEBD) değerleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. İndeks deneyleri için (SH ve NYD) optimum birim hücre sayısının (S), seçilen yüzey alanının 4 katı olduğu tespit edilmiştir. Tüm çalışma sahası için genel olarak SH, NYD ve TEBD deney sonuçları sırası ile  $N = 21,35 \pm 1,86$ ,  $I_s(50) = 0,704 \pm 0,133$  MPa,  $\sigma_c = 7,84 \pm 3,69$  MPa olarak belirlenmiştir. Dolaylı indeks deneyleri (SH ve NYD) ile belirlenen amprik TEBD sonuçlarının, gerçek TEBD deney sonuçları ile örtüşmediği tespit edilerek kiltası için düzeltme katsayıları ( $k_{SH} = 0,22$  ve  $k_{NYD} = 0,51$ ) önerilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kaya mekaniği, Yerinde indeks deneyler, Kiltası, Schmidt sertlik, Nokta yükleme dayanım

### An approach to the use of index tests in determining of in-situ strength of weak rock materials

**ABSTRACT:** This study was carried out in the A6 longwall panel, where preparations are in progress in TKİ-GLİ-Ömerler underground mine. In this study, it is aimed to determine the strength of the weak and stratified claystone located in floor of thick coal seam. It was encountered with claystone in excavations carried out in the transportation roadway face and in the guide roadway face, which will be used for A6 panel. It was planned to carry out in situ Schmidt hardness (SH) and point load (NYD) index tests in large scale excavation faces. For this purpose, SH tests were performed in 9 excavation faces and also NYD index tests were carried out in 3 of them. The test areas, which has totaling 66,75 m<sup>2</sup>, were divided into 267 units of measuring cells, of which has 0.25 m<sup>2</sup> each area. SH tests were performed at the midpoint of the unit cells with at least three repeats. In addition, NYD index tests were carried out on

three irregular samples taken from the same unit cells. ISRM (2007) and ASTM (1993), which provide recommendations for laboratory-scale experiments, do not provide a clear recommendation on how to perform field applications. Studies carried out to overcome this problem are presented in this article. In this study, a total of 801 SH test results and 336 NYD index test results were evaluated together. As a result of the analysis made; (i) the size of the test area and the number of units of measurement cells were determined to give the optimum test result, (ii) the mechanical relationships between the test results were examined, and (iii) uniaxial compressive strength (TEBD) values were determined and compared using suggested empirical approaches for index test results. It was determined for index tests that the optimum unit cell number (S) was determined to be 4 times the selected surface area. In general, SH, NYD and TEBD test results for all experimental areas were determined as  $N = 21.35 \pm 1.86$ ,  $I_s(50) = 0.704 \pm 0.133$  MPa,  $\sigma_c = 7.84 \pm 3.69$  MPa, respectively. It was determined that the empirical TEBD results determined by indirect index tests (SH and NYD) did not match the actual TEBD test results. Therefore, in this study, correction coefficients ( $k_{SH} = 0.22$  and  $k_{NYD} = 0.51$ ) were proposed for the claystone rock unit.

**Key Words:** *Rock mechanics, In-situ index tests, Claystone, Schmidt hardness, Point load strength*

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaya malzeme ve kütle özellikleri, yeraltı ve yerüstü kaya mühendislik yapılarının tasarımlarında kullanılan çok önemli girdi parametreleridir. Malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik deney yöntemleri ISRM (2007) ve ASTM (1993) tarafından ortaya konmuştur. ISRM (2007) ve ASTM (1993) tarafından önerilen deneysel yöntemler ile belirlenen tek eksenli basma dayanımı, çekme dayanımı, elastik modül, Poisson oranı, kohezyon, içsel sürtünme açısı, asal gerilme değerleri belirlenebilmektedir. Ancak bu parametrik mekanik değerlerin belirlenmesinde önerilen yöntemler için düzgün örneklerin hazırlanması gerektirmektedir (ISRM, 2007; ASTM, 1993). Kaya mühendislik yapılarının tasarım çalışmalarında çok sık kullanılan tek eksenli basma dayanımı (TEBD) deneyi, özellikle zayıf-tabakalı-kil içerikli-yoğun süreksizlik içeren kaya malzemelerinde örnek hazırlamada karşılaşılan zorluklar nedeni ile çoğu zaman olanaksız olmaktadır (Broch ve Franklin, 1972; Özkan, 1989; Unal, 1992; Ulusay ve diğ., 1995; Özkan ve Bilim, 2008). ISRM (2007) ve ASTM (1993) tarafından bu sorunun aşılması için dolaylı deney yöntemleri önerilmektedir. SH ve NYD indeks deneyleri, bu deney yöntemleri arasında yer almaktadır. Her iki indeks deneyi için verilen önerilerin daha çok laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen deneyler için olduğu dikkat çekmektedir. Hafif ve taşınabilir özelliğe sahip laboratuvar ölçekli bu iki deney cihazı ile deneylerin yapılması pratik olduğu için saha çalışmalarında da kullanılmaktadır.

## MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Büyük ölçekli nakliye ve kılavuz galeri arınında karşılaşılan zayıf ve tabakalı kıltaşı kaya malzemesinin yerinde malzeme özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak planlanan bu çalışmada, SH ve NYD deneylerinin yapılmasına karar verilmiştir. Ancak genel olarak laboratuvar ölçekte deneylerin yapılmasına ve değerlendirmesine yönelik öneriler veren ISRM (2007) ve ASTM (1993), büyük ölçekli yüzeylerde uygulamanın nasıl yapılacağı konusunda açık bir öneri vermemektedir. Karşılaşılan bu sorunun aşılması ve en doğruya yakın TEBD değerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar bu makalede sunulmuştur.

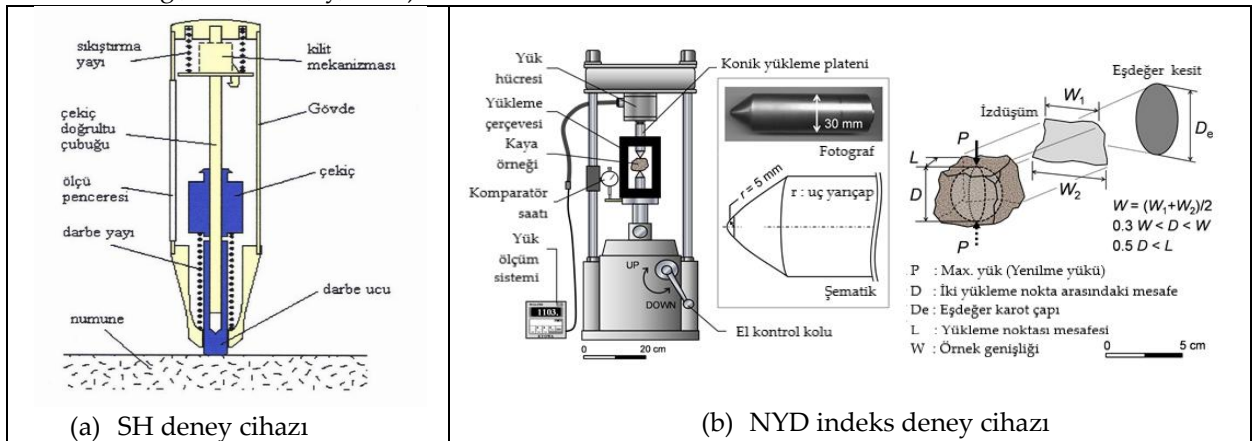
### Schmidt Sertlik (SH) İndeks Deneyi (Schmidt Hardness Index Test)

Tüm kaya malzemelerinde kullanılmak ile birlikte özellikle zayıf-tabakalı-yoğun süreksizlik içeren kaya malzemelerinin ve süreksizlik yüzeylerinin dolaylı yoldan dayanım değerlerinin belirlenmesinde kullanılan SH, bugün kaya mekaniği çalışmalarında oldukça yaygın kullanılan bir deney cihazıdır. Hafif

ve taşınabilir olan deney cihazı sıkıştırılmış bir yay içermektedir. Deney esnasında bu yay, serbest kalarak ucundaki pim ile hızla kaya yüzeyine vurmakta ve pim geriye sıçramaktadır (Şekil 1a). Kaya yüzeyinin dayanımına bağlı olarak oluşan sıçrama mesafesi, kaya yüzeyinin sertliği olarak tanımlanmaktadır (ISRM, 2007). Sertlik değeri belirlenecek malzemede en az 20 ölçümün alınması ve bu ölçümlerin küçük olan en az %50' sinin atılması daha sonra geriye kalan verilerin aritmetik ortalamasının alınması ISRM (2007) ve ASTM (1993) tarafından önerilmektedir. Geliştirilen bir abak (Deere ve Miller, 1966) yardımıyla malzemenin yoğunluk ve ölçülen SH değeri kullanılarak dolaylı yoldan TEBD değeri belirlenebilmektedir. Ayrıca SH deney sonuçları, kaya kütlelerinin makaslama dayanım davranışını açıklayan yaklaşımda girdi parametresi olarak kullanılmaktadır (Barton, 1973).

### Nokta Yükleme Dayanımı (NYD) İndeks Deneyi (Point Load Strength Index Test)

İki konik uç tarafından noktasal olarak baskıya maruz bırakılan örnekler noktasal olarak kırılmaktadır (Şekil 1b). TEBD deneylerine yönelik örnek hazırlanamadığı koşullarda karot özelliği taşıyan küçük karot örnekleri üzerinde çapsal ve eksenel NYD deneyleri gerçekleştirilmektedir. Her iki deney sonucunun aritmetik ortalaması alınarak NYD deney sonucu, eksenel deney sonucunun çapsal deney sonucuna oranı ile de anisotropi ( $I_a$ ) indeks değeri hesaplanabilmektedir. Bu prosüdür karot özelliği taşımayan düzensiz örnekler için de geçerlidir. NYD indeks deneyi ile tek eksenli basma ve çekme dayanımı değerleri arasında doğrusal bir yaklaşım olduğu birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur (Bieniawski, 1975; Özkan, 1989; Chau ve Wong 1996; Hawkins, 1998; Kahraman, 2001; Öztürk ve diğ., 2004, Akbay, 2018).



### Yeraltı Deney Alanı Hakkında Genel Bilgi (The General Information about Underground Test Area)

Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ)'ne bağlı Kütahya-Tunçbilek-Ömerler yeraltı ocağında (GLİ) (Şekil 2a), mekanize kazı sistemi ile geri dönümlü göçertmeli uzun ayak üretim yöntemi kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan üretim yönteminde önce arındaki kömür tamburlu kesici-yükleyici ile bir have kesilmekte daha sonra ayak içindeki zincirli konveyör-tamburlu kesici yükleyici-yürüyen tahkimat üniteleri yeni arına yaklaştırmak için öne çekilmektedir. Uzunayak arkasında boşta kalan bölge üzerinde bulunan kömür ve onun üzerinde bulunan tavan taşı kırılarak düşmektedir. Ayak arkasında ilk önce kırılarak düşen kömür, ayak arkasından alındıktan sonra üst kısımda kırılmış vaziyette bekleyen kaya blokları aşağıya inmiş olmaktadır. Böylelikle üretimde bir üretim periyodu tamamlanmış olmakta yeni kazı aşamasına geçilmektedir. Uzunayak arkasında oluşan göçük bölgesi, gerileme dağılımlarının belirli bir dengeye ulaşmasına yardımcı olmaktadır (Peng ve Chiang, 1984).

Bölgede kömür kalınlığı 8-10 m aralığında olup kömür damarının alt kısmındaki yaklaşık 3,5 metrelik dilimi kazılarak alınırken bu dilimin üstünde kalan 5-6 metrelik kısım yürüyen tahkimat

birimlerinin arkasından göçertilerek alınmaktadır. Kömür ondülasyonu veya fay sistemleri nedeni ile kazı arını bazen taban taşı olabilmektedir.

Bu makalede verilen deneysel çalışmaların yerini gösteren bir plan görünüşü Şekil 2b' de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında yürütülen saha çalışmaları, hazırlık aşamasında olan A6 panosunun nakliye ve kılavuz galerisinde gerçekleştirilmiştir. A6 nakliye galerisi at nalı kesitine, kılavuz galerisi ise trapez kesitine sahiptir. Deney alanları iki farklı konumdan oluşmuştur. İlki galeri arınlarında diğeri ise galeri yan yüzeylerinde konumlanmıştır. Deneylerin gerçekleştirildiği galerilerin genişlikleri 5.5 m yükseklikleri 4.5 m olup galeri kesitleri yaklaşık 24 m<sup>2</sup>'dir. Galeri arınında taban taşı kilitasında seçilen yüzeyler 7-11 m<sup>2</sup>'lik büyüklüklere sahip iken galeri yan yüzeylerinde seçilen deney alanları 2-5 m<sup>2</sup> yüzey alanlarına sahip olmuştur. Tipik bir deney bölgesi Şekil 2c ve 2d' de sunulmuştur.

## YERİNDE DENEYSEL ÇALIŞMALAR (IN-SITU TEST STUDIES)

Galeri yüzeyinde karşılaşılan kilitaşı kaya malzemesine ait tek eksenli basma dayanımı (TEBD) değerini belirlemek bu çalışmanın ilk adımını oluşturmuştur. Kilitaşı malzemesinin zayıf ve tabakalı bir yapı içermesi nedeni ile galeri arınından kaya bloklarının alınmasında zorluklar ile karşılaşılmış ve sahadan temin edilen kaya bloklarından sınırlı sayıda TEBD örneği hazırlanabilmiştir. Hazırlanan veri tabanını güçlendirmek amacıyla, küçük ve düzensiz örnekler üzerinde deney yapılabilen NYD indeks deneylerinin ve kazı yüzeyinde SH deneylerinin yapılması planlanmıştır.

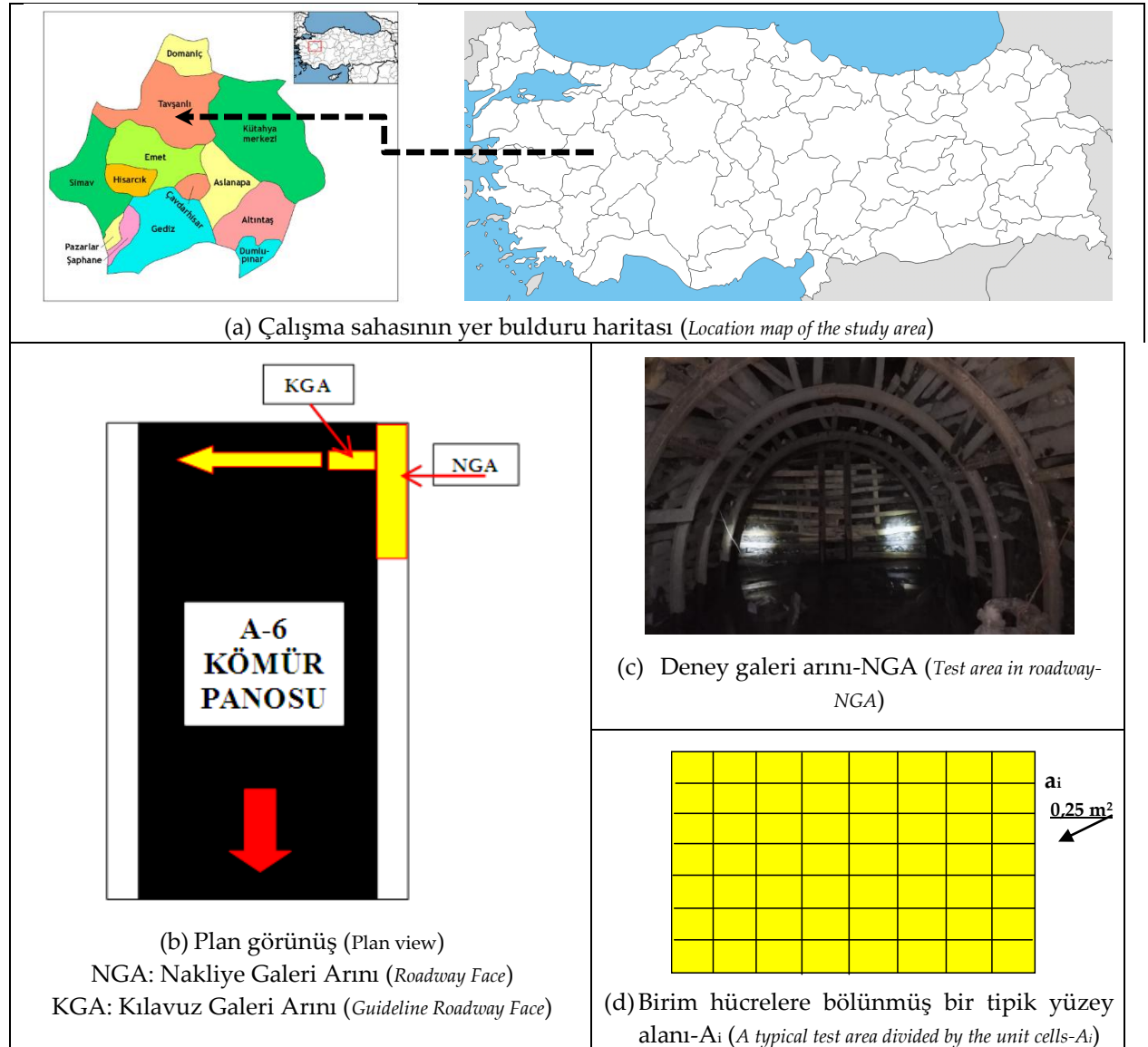
Şekil 2' de belirtilen A6 panosu nakliye galerisine ait hazırlık çalışması ile oluşturulan iki farklı galeri arınında (NGA-1, 2), iki farklı kılavuz galeri arınında (KGA-1, 2) ve bir kılavuz galerisi yan yüzeyinde (KGY-1, A6 panosunun uzunayak üretim arını olacak olan) ve nakliye galerisi yan yüzeylerinde 4 farklı bölgede (NGYY-1, 2, 3, 4) olmak üzere toplam 9 büyük yüzeyde deneylerin yapılması planlanmıştır. Dokuz yüzeyde sadece SH belirleme, bunların üçünde (NGA-1, KGA-1 ve KGY-1) ise hem SH hem de NYD deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar yardımıyla bir veri tabanı hazırlanmıştır. Bu ölçüm alanları aşağıda sunulan Çizelge 1' de tanımlanmıştır. Her iki deneyin sahadan büyük ölçekli yüzeylerde uygulanması için ISRM (2007) tarafından bir öneri bulunmaz iken ASTM (1993) tarafından sadece SH deneyleri için bir öneri verilmektedir. Saha uygulamaları için uygulama yapılan noktadan en az 15 cm uzaklıkta başka bir noktaya tekrar SH deneyinin uygulanması gerektiği vurgulanırken büyük ölçekli yüzeyin genel sonucunu belirleyebilmek için deneyin kaç kez tekrarlanması gerektiği konusunda herhangi bir bilgi verilmemiştir (Özkan, 2008; Mesutoğlu ve Özkan, 2019). Her iki deney için bu çalışmada Şekil 2d ve Çizelge 1'de belirtildiği üzere büyük ölçekli yüzeyler (A<sub>i</sub>), kenar uzunlukları 0,5 m x 0,5 m olan 0,25 m<sup>2</sup>'lik birim ölçüm hücrelere (a<sub>i</sub>) bölünmüştür. Büyük ölçekli ölçüm yüzeylerinde (A<sub>i</sub>) hazırlanan birim ölçüm hücresinin (a<sub>i</sub>) her birinde NYD ve SH indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 1.** A6 panosunda gerçekleştirilen saha deneyleri için hazırlanan ölçüm alanları

**Table 1.** Test areas prepared for in situ tests carried out in A6 panel.

| Ölçüm alanı                    | Ölçüm alanı tanımı | Ölçüm alan büyüklüğü (A <sub>i</sub> )<br>m <sup>2</sup> | Ölçüm alanında oluşturulan birim ölçüm hücre (a <sub>i</sub> ) adedi (S) |               |
|--------------------------------|--------------------|--|--|---------------|
|                                |                    |  | SH Deneyleri   | NYD Deneyleri |
| Nakliye Galeri Arını (NGA)     | NGA-1              | 10,75  | 43   | 43            |
|                                | NGA-2              | 7,25   | 29   | -             |
| Kılavuz Galeri Arını (KGA)     | KGA-1              | 10   | 40   | 40            |
|                                | KGA-2              | 8,25   | 33   | -             |
| Nakliye Galeri Yan Yüzü (NGYY) | NGYY-1             | 3,50   | 14   | -             |
|                                | NGYY-2             | 2,75   | 11   | -             |
|                                | NGYY-3             | 4,75   | 19   | -             |
|                                | NGYY-4             | 3  | 12   | -             |
| Kılavuz Galeri Yan Yüzü (KGY)  | KGY-1              | 16,5 (7,25+9,25)<br>(İki bitişik alan)                   | 66 (29+37)<br>(İki bitişik alan)   | 29            |
| Toplam                         |                    | 65   | 260  | 112           |





Şekil 2. Deneysel çalışmaların yürütüldüğü bölge ve A6 panosuna ait plan görünüş

Figure 2. Location map of the study area and mMine plan showed the experimental locations in A6 panel

### Schmidth Sertlik (SH) İndeks Deneyleri (Schmidt Hardness Index Tests)

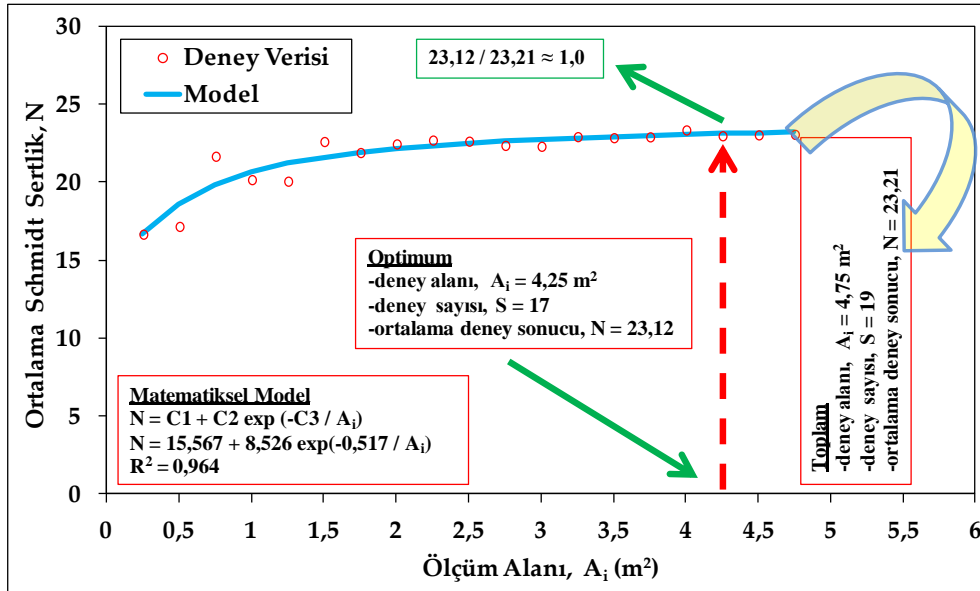
TKİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocağında A6 uzunayak panosunda gerçekleştirilen hazırlık çalışmaları kapsamında delme-patlatma ile açılan nakliye galerisi arınında iki farklı yüzeyde (NGA-1, 2), uzunayak panosunun arınıni oluşturmak amacıyla açılan klavuz galerisinin iki farklı yüzeyinde (KGA-1, 2), kılavuz galerisinin yan yüzeyinde (KGY-1) ve nakliye galerisinin dört farklı yan yüzeyinde (NGY-1, 2, 3, 4) olmak üzere seçilen toplam 66,75 m<sup>2</sup> yüzeyde 267 adet birim ölçüm hücresi ( $a_i$ ) hazırlanmıştır. Her bir birim hücrede en az üç kez SH indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir. Herbir birim hücrede gerçekleştirilen 3 adet SH deney sonucunun öncelikle ortalaması alınarak ilgili birim hücrenin ( $a_i$ ) SH değeri belirlenmiştir.

Deney alanlarının büyük bir bölümünü kömür damarı altında kalan taban taşıni kilitaşı oluşturmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar yardımıyla büyük ölçekli yüzeylerin ortalama SH deney sonucunu bulmak amacıyla Özkan ve Bilim (2008) tarafından önerilen yaklaşım kullanılmıştır. Buna göre, her bir hücreden ( $a_i$ ) alınan deney sonuçlarının genel ortalaması yerine ilaveli ortalama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde önce birinci birim ölçüm hücresi ( $a_1$ ) deney sonucu ile ikinci birim hücre ( $a_2$ ) ölçüm deney sonucunun ortalaması alınmaktadır. Daha sonra bu ortalama deney sonucu, ilk

üç birim hücre ölçüm bölgesinin  $[(a_1+a_2+a_3)/3]$  ortalaması ile karşılaştırılmaktadır. Eğer her iki sonuç arasındaki fark büyük ise bu takdirde ilk dört birim hücre ölçüm bölgesinin  $[(a_1+a_2+a_3+a_4)/4]$  ortalaması alınmakta ve ilk üç bölge ortalaması ile karşılaştırılmaktadır. Yine ortalamalar arasında fark büyük ise bu safer ilk beş birim hücreye  $[(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5)/5]$  ait ortalama ile ilk dört birim hücre ortalaması karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmalar sistematik olarak yapılırken öyle bir birim ölçüm bölge sayısı vardır ki bundan sonra ortalama sonuçları çok değişmemektedir. Bu kritik noktanın bulunması ile optimum deney sayısı ve deneysel birim hücre ölçüm bölge sayısı (S) belirlenebilmektedir.

Yukarıda tanımlanan bu işlemler tipik olarak NGYY-3 ölçüm yüzeyi için Şekil 3’de sunulmuştur. Bu grafik üzerinde belirtildiği gibi SPSS V17.0 istatistik programı yardımıyla matematiksel eşitlikler türetilmiştir. Tüm ölçüm bölgelerine ait geliştirilen matematiksel eşitlik katsayıları ( $C_1$ ,  $C_2$  ve  $C_3$ ) Çizelge 2’de sunulmuştur. İstatiksel  $R^2$  değerleri NGA-1 ve KGY-1 için nispeten düşük, diğerleri için ise yüksek bulunmuştur. Şekil 3’de görüldüğü gibi deney sonucunu verecek optimum yüzey alanı ( $A_i$ ) grafikten kolaylıkla belirlenebilmektedir. Toplam  $4,75 \text{ m}^2$  yüzey alanına sahip NGYY-3 yüzey alanının aslında  $4,25 \text{ m}^2$ ’lik kısmında deneyler gerçekleştirilseydi yüzeyin optimum SH değerine ulaşılabilirdi.

Bu çalışmada dikkate alınan 9 farklı yüzey alanında gerçekleştirilen deney sonuçlarına dayalı yapılan istatistiksel analizler neticesinde belirlenen optimum yüzey alanı ( $A_i$ ) ve bu yüzey alanında hazırlanması gereken birim hücre ( $a_i = 0,25 \text{ m}^2$ ) sayıları (S) Çizelge 3’de sunulmuştur. Bu değerler yardımıyla Şekil 4’de sunulan grafik hazırlanmıştır. Tunçbilek kömür ocağında karşılaşılan taban taşı kiltasında rastgele seçilen büyük ölçekli bir yüzeyde planlanacak SH deneyleri için hazırlanması gereken birim hücre sayısı (S) belirlenebilmektedir. Örneğin  $5 \text{ m}^2$ ’lik bir alanda ( $A_i$ ) deneylerin yapılması planlanırsa, bu yüzey üzerinde her biri  $0,25 \text{ m}^2$  olan birim ölçüm hücrelerinden (S) 20 adet ( $S = 4 \cdot A_i$ ) hazırlanması gerektiği grafikten (Şekil 4) belirlenebilecektir. Grafik üzerinde bu konuda yapılmış iki ayrı araştırma (Özkan, 2008; Mesutoğlu ve Özkan, 2019) tarafından önerilen eşitliklerde belirtilmiştir. Bu makale çalışmasına ait sonuçlar tavan taşı, taban taşı ve kömür ara kesmelerinde konumlanan çevre kayacı kiltası iken, referans yayınlara ait sonuçlar sadece kömür malzemesine aittir.



Şekil 3. NGYY-3 ölçüm bölgesine bağlı hesaplanan ilaveli ortalama SH deney sonuçları

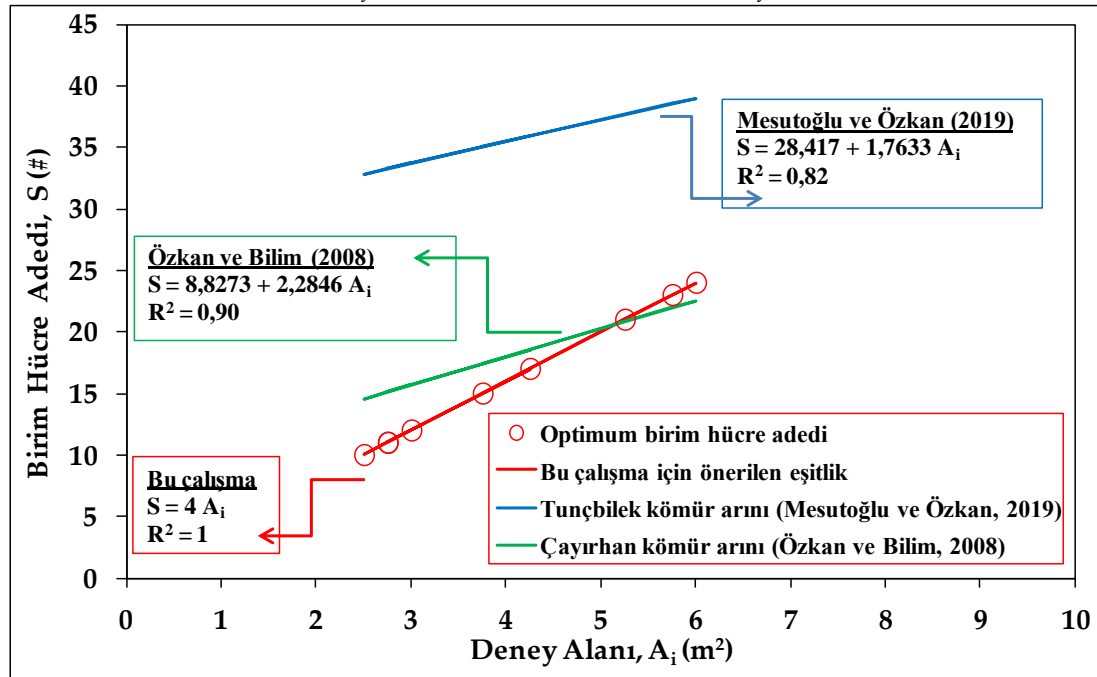
Figure 3. The calculated average Schmidt hammer (SH) test results based on NGYY-3 measurement area

**Çizelge 2.** SH deneyleri için SPSS V17.0 yardımıyla belirlenen istatistiksel model ve sabitleri*Table 2. The statistical model and statistical constants determined by SPSS V17.0 for SH tests*

| Ölçüm Bölgesi | Model   | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|---------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| NGA-1         |   | 13,892         | 8,467          | 0,1            | 0,563          |
| NGA-2         |   | 15,000         | 8,086          | 0,375          | 0,840          |
| KGA-1         |   | 15,000         | 8,261          | 0,424          | 0,832          |
| KGA-2         |   | 17,000         | 5,596          | 0,504          | 0,865          |
| NGYY-1        | N = C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> exp (-C <sub>3</sub> / A <sub>i</sub> )<br>A <sub>i</sub> : Deneş alanı (m <sup>2</sup> ) | 10,000         | 9,710          | 0,117          | 0,930          |
| NGYY-2        |   | 30,000         | -13,996        | 0,578          | 0,945          |
| NGYY-3        |   | 15,567         | 8,526          | 0,517          | 0,964          |
| NGYY-4        |   | 20,056         | -2,508         | 1,924          | 0,822          |
| KGY-1         |   | 29,608         | -7,000         | 0,077          | 0,630          |

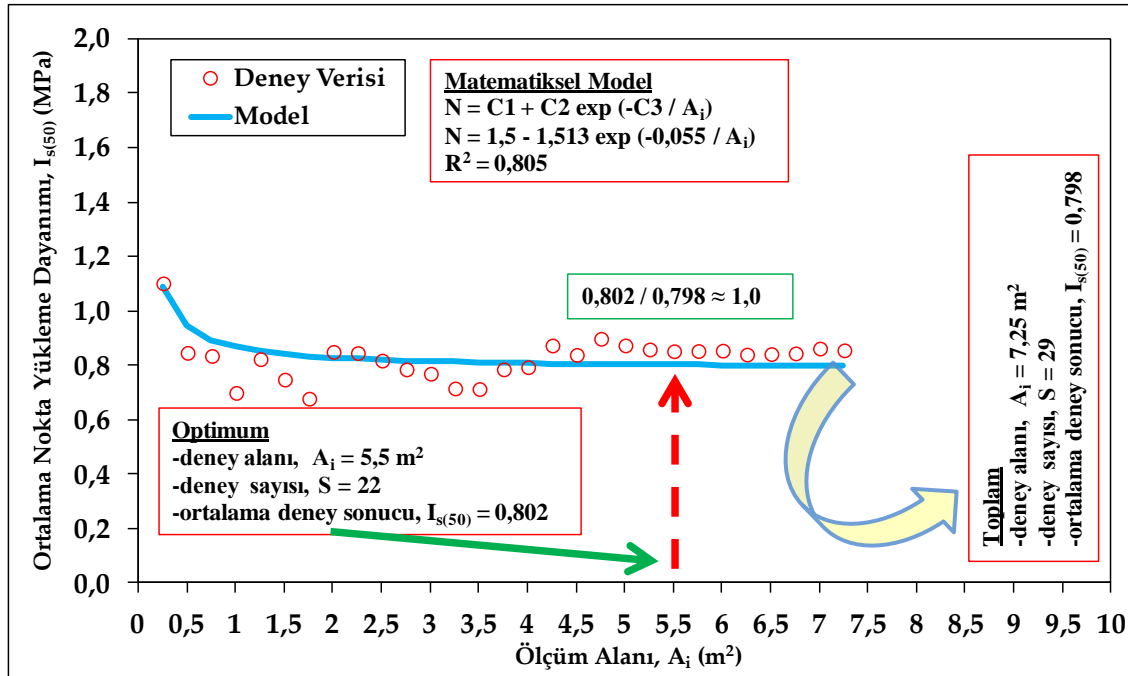
**Çizelge 3.** SH deney sonuçları (Birim ölçüm hücresi, a<sub>i</sub> = 0,25 m<sup>2</sup>)*Table 3. The results of Schmidt hammer (SH) test (The unit measurement area, a<sub>i</sub> = 0,25 m<sup>2</sup>)*

| Ölçüm alanı                    | Ölçüm alanı tanımı | Deney alanı, A <sub>i</sub> | Birim ölçüm hücre adedi, S | Toplam            |     |                  | Optimum           |     |                  |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------------|-------------------|-----|------------------|-------------------|-----|------------------|
|                                |                    |                             |                            | A <sub>i</sub>    | S   | N                | A <sub>i</sub>    | S   | N                |
|                                |                    | (m <sup>2</sup> )           | (#)                        | (m <sup>2</sup> ) | (#) | (-)              | (m <sup>2</sup> ) | (#) | (-)              |
| Nakliye Galeri Arını (NGA)     | NGA-1              | 10,75                       | 43                         | 10,75             | 43  | 22,28±0,5        | 3,75              | 15  | 22,14±0,7        |
|                                | NGA-2              | 7,25                        | 29                         | 7,25              | 29  | 22,68±1,3        | 5,25              | 21  | 22,53±1,4        |
| Kılavuz Galeri Arını (KGA)     | KGA-1              | 10                          | 40                         | 10                | 40  | 22,85±1,4        | 6                 | 24  | 22,70±1,5        |
|                                | KGA-2              | 8,25                        | 33                         | 8,25              | 33  | 22,26±1,0        | 5,75              | 23  | 22,13±1,1        |
| Nakliye Galeri Yan Yüzü (NGYY) | NGYY-1             | 3,50                        | 14                         | 3,5               | 14  | 19,39±0,9        | 2,5               | 10  | 19,27±1,0        |
|                                | NGYY-2             | 2,75                        | 11                         | 2,75              | 11  | 18,66±3,1        | 2,75              | 11  | 18,66±3,1        |
|                                | NGYY-3             | 4,75                        | 19                         | 4,75              | 19  | 23,21±1,8        | 4,25              | 17  | 23,12±1,8        |
|                                | NGYY-4             | 3,00                        | 12                         | 3,0               | 12  | 18,74±0,5        | 2,75              | 11  | 18,81±0,4        |
| Kılavuz Galeri Yan Yüzü (KGY)  | KGY-1              | 16,5                        | 66                         | 16,5              | 66  | 22,64±0,3        | 3,0               | 12  | 22,79±0,5        |
| Toplam                         |                    | 66,75                       | 267                        | 66,75             | 267 | 21,41±1,89 (ort) | 36                | 144 | 21,35±1,86 (ort) |

A<sub>i</sub> : Deneş alanı, S : Birim hücre adedi, N : SH deneş sonucu.**Şekil 4.** SH deneyleri için rastgele seçilen bir yüzey alanına (A<sub>i</sub>) ait birim hücre ölçüm alan sayısı (S)*Figure 4. The unit measurement number (S) determined for the randomly selected a measurement area (A<sub>i</sub>) for SH tests*

### Nokta Yükleme Dayanımı (NYD) İndeks Deneyleri (Point Load Strength Index Tests)

TKİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocağı A6 uzunayak panosunda açılan nakliye galerisi arınında bir kez (NGA-1), uzunayak panosunun arınınu oluşturmak amacıyla açılan klavuz galerisi arınında bir kez (KGA-1), klavuz galerisinin yan yüzeyinde bir kez (KGY-1) olmak üzere NYD deneyleri planlanmıştır. Bu yüzeyler toplamda 112 adet birim ölçüm hücreesine bölünmüş ve her birinden alınan üç adet düzensiz örnek üzerinde tabakalara dik ve tabakalara paralel olmak üzere NYD indeks deneyleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle herbir hücreden alınan düzensiz örneğe ait ortalama NYD değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra SH deneylerinde olduğu gibi birim hücre ölçüm bölge sayısı (S) elde edilmiştir. Sahada gerçekleştirilen NYD deneylerine ait tipik bir örnek KGY-1 ölçüm sahası için Şekil 5’de sunulmuştur. Birim hücre alanlarına bağlı hesaplanarak bulunan NYD değerleri ile örtüşen eğrinin belirlenmesi için SPSS V17.0 paket programı ile bir seri istatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 4’de sunulmuştur. SH ve NYD deney sonuçlarını en iyi açıklayan matematiksel modelin aynı olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 2 ve 4). Şekil 5’de sunulan grafikten görüldüğü üzere, toplam 7,25 m<sup>2</sup>’lik yüzey alanında oluşturulan 29 adet birim hücrede yapılan NYD deneyleri yerine aynı yüzeyin 5,5 m<sup>2</sup>’lik kısmında oluşturulan 22 adet birim hücreden alınan sonuçların aslında bu yüzeyi tanımlama da yeterli olabileceği anlaşılmaktadır. NGA-1, KGA-1 ve KGY-1 yüzey alanları için yapılan analizlerden elde edilen optimum deney sayıları Çizelge 5’de verilmiştir. Çizelge 5 verisi ile hazırlanan Şekil 6’dan, NYD deneyi için rastgele seçilecek bir yüzey alanında (A<sub>i</sub>) hazırlanacak birim hücre adedi belirlenebilecektir. NYD deneyleri için belirlenen eşitlik (Şekil 6) ile SH deneyleri için belirlenen eşitliğin (Şekil 4) aynı karakterde olduğu dikkat çekmektedir. Örneğin rastgele seçilecek 5 m<sup>2</sup>’lik bir yüzeyde (A<sub>i</sub>), NYD deneylerinin yapılması planlarsa, bu yüzey üzerinde her biri 0,25 m<sup>2</sup> olan birim ölçüm hücrelerinden (S) 20 adet (S = 4\*A<sub>i</sub>) hazırlanması gerektiği Şekil 6’da sunulan grafikten belirlenebilecektir.



Şekil 5. KGY-1 ölçüm bölgesine bağlı hesaplanan ortalama NYD indeks deney sonuçları

Figure 5. The calculated average point load strength (NYD) index test results based on KGY-1 measurement area

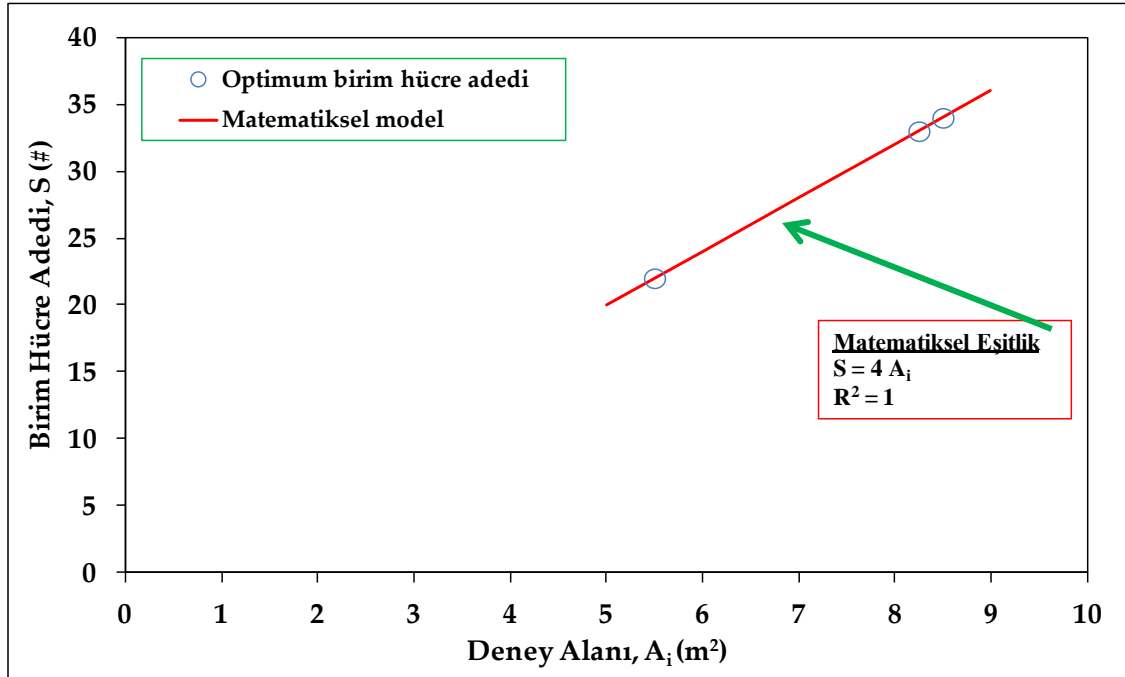
**Çizelge 4.** NYD indeks deneyleri için SPSS V17.0 yardımıyla belirlenen istatistiksel model ve sabitleri*Table 4. The statistical model and statistical constants determined by SPSS V17.0 for NYD index tests*

| Ölçüm Bölgesi | Model   | C <sub>1</sub> | C <sub>2</sub> | C <sub>3</sub> | R <sup>2</sup> |
|---------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| NGA-1         | N = C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> exp (-C <sub>3</sub> / A <sub>i</sub> )<br>A <sub>i</sub> : Deney alanı (m <sup>2</sup> ) | 1,5            | -0,961         | 0,122          | 0,758          |
| KGA-1         |   | 0,134          | 0,650          | 0,343          | 0,862          |
| KGY-1         |   | 2,3            | -1,513         | 0,055          | 0,805          |

**Çizelge 5.** NYD deney sonuçları (Birim ölçüm hücresi, a<sub>i</sub> = 0,25 m<sup>2</sup>)*Table 5. The results of point load strength (NYD) test (The unit measurement area, a<sub>i</sub> = 0,25 m<sup>2</sup>)*

| Ölçüm alanı                   | Ölçüm alanı tanımı | Deney alanı, A <sub>i</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | Birim ölçüm hücre adedi, S<br>(#) | Toplam                              |          |                             | Optimum                             |          |                             |
|-------------------------------|--------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|
|                               |                    |  |                                   | A <sub>i</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | S<br>(#) | I <sub>s(50)</sub><br>(MPa) | A <sub>i</sub><br>(m <sup>2</sup> ) | S<br>(#) | I <sub>s(50)</sub><br>(MPa) |
| Nakliye Galeri Arını (NGA)    | NGA-1              | 10,75  | 43                                | 10,75                               | 43       | 0,550±0,07                  | 8,25                                | 33       | 0,553±0,07                  |
| Kılavuz Galeri Arını (KGA)    | KGA-1              | 10   | 40                                | 10                                  | 40       | 0,762±0,09                  | 8,5                                 | 34       | 0,758±0,10                  |
| Kılavuz Galeri Yan Yüzü (KGY) | KGY-1              | 7,25   | 29                                | 7,25                                | 29       | 0,798±0,06                  | 5,5                                 | 22       | 0,802±0,07                  |
| Toplam                        |                    | 28   | 112                               | 27,75                               | 112      | 0,703<br>±0,134<br>(ort)    | 22,25                               | 89       | 0,704<br>±0,133<br>(ort)    |

A<sub>i</sub> : Deney alanı, S : Birim hücre adedi, I<sub>s(50)</sub> : NYD deney sonucu.

**Şekil 6.** NYD deneyi için rastgele seçilen bir yüzey alanında (A<sub>i</sub>) birim hücre ölçüm alan sayısı (S)*Figure 6. The unit measurement number (S) determined for the randomly selected a measurement area (A<sub>i</sub>) for NYD test.*

### Tek Eksenli Basma Dayanımı (TEBD) Deneyleri (Uniaxial Compressive Strength Test)

Bu çalışmada, sahadan sınırlı sayıda alınabilen kaya bloklarından alınan küp örnekler üzerinde direkt tek eksenli basma dayanımı (TEBD) deneyleri yapılabilmektedir. Zayıf ve tabakalı taban taşı kiltası üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları Çizelge 6'da sunulmuştur. Çizelge 6'da verilen deney sonuçlarından ortalama tek eksenli basma dayanımı (TEBD) değerinin  $7,84 \pm 3,69$  MPa olduğu anlaşılmaktadır.

**Çizelge 6.** Tek eksenli basma dayanımı sonuçları*Table 6. The uniaxial compressive strength test results*

| Örnek No | Boy<br>H<br>mm | En<br>W1<br>mm | Derinlik<br>W2<br>mm | Yenilme Yüğü F<br>kN | Tek Eksenli Basma Dayanımı<br>(TEBD) $\sigma_c$<br>MPa |
|----------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|--|
| TBN-1    | 51,99          | 51,80          | 49,65                | 24,90                | 9,68   |
| TBN-2    | 51,22          | 53,00          | 51,70                | 12,80                | 4,67   |
| TBN-3    | 50,08          | 52,35          | 51,81                | 22,00                | 8,11   |
| TBN-4    | 51,58          | 49,35          | 51,47                | 16,10                | 6,34   |
| TBN-5    | 51,63          | 51,62          | 51,99                | 15,60                | 5,81   |
| TBN-6    | 52,39          | 51,77          | 51,15                | 25,10                | 9,48   |
| TBN-7    | 51,35          | 50,37          | 51,62                | 13,40                | 5,15   |
| TBN-8    | 53,43          | 52,35          | 50,06                | 9,30                 | 3,55   |
| TBN-9    | 52,47          | 51,98          | 50,50                | 14,70                | 5,60   |
| TBN-10   | 52,64          | 50,58          | 52,78                | 13,60                | 5,09   |
| TBN-11   | 50,02          | 53,22          | 52,44                | 23,30                | 8,35   |
| TBN-12   | 51,42          | 52,19          | 41,04                | 24,20                | 11,30  |
| TBN-13   | 50,50          | 51,65          | 51,90                | 23,90                | 8,92   |
| TBN-14   | 50,64          | 52,20          | 52,34                | 40,00                | 14,64  |
| TBN-15   | 50,16          | 52,46          | 51,95                | 28,80                | 10,57  |
| TBN-16   | 50,11          | 51,98          | 51,46                | 33,70                | 12,60  |
| TBN-17   | 52,72          | 52,03          | 52,10                | 9,30                 | 3,43   |
| TBN-18   | 52,67          | 52,29          | 50,14                | 20,80                | 7,93   |
| TBN-19   | 51,87          | 51,92          | 49,92                | 37,60                | 14,51  |
| TBN-20   | 52,17          | 52,54          | 48,14                | 2,90                 | 1,15   |
| Ortalama |                |                |                      |                      | 7,84 ± 3,69  |

## BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

TKİ-Tunçbilek Ömerler yeraltı kömür ocağında A6 uzunayak hazırlık panosu nakliye galerisi arını (NGA), kılavuz galerisi arını (KGA) ve bu galerilerin yan yüzelerinde (NGYY ve KGY) olmak kaydı ile SH belirleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu tür deneyler, toplam 66,75 m<sup>2</sup> yüzey alanına sahip büyük ölçekli arınlarda hazırlanan 267 adet birim ölçüm hücresinde ( $a_i = 0,25 \text{ m}^2$ ) 801 adet deney ile gerçekleştirilmiştir. NYD deneyleri ise 3 ayrı bölgenin (NGA-1, KGA-1 ve KGY-1) tüm arınında sistematik olarak oluşturulan toplam 112 adet birim hücreden ( $a_i = 0,25 \text{ m}^2$ ) alınan toplam 336 adet düzensiz örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Her iki deneyin gerçekleştirildiği üç bölgede (NGA-1, KGA-1 ve KGY-1)'den belirlenen ortalama SH belirleme ve NYD deney sonuçları arasında herhangi bir matematiksel ilişki belirlenmemiştir (Şekil 7). Bunun nedeni deneylerin aynı kaya biriminde gerçekleştirilmemesi olabilir. Bu durum ayrıca üç ölçüm bölgesinde gerçekleştirilen 112 birim ölçüm hücresinden ( $a_i$ ) alınan tüm sonuçlar üzerinde de incelenmiştir (Şekil 8). Benzer durum bu koşul altında da ortaya çıkmıştır. Tüm değerlerin iki sınır hat arasında geniş bir koridor içinde yoğunlaştığı görülmektedir.

Yerinde gerçekleştirilen SH ve NYD deneyleri dolaylı deneyler olup asıl hedef örnek hazırlanmasın da zorluk çekilen tek eksenli basma dayanımı (TEBD) değerlerine ulaşmaktır. Literatürde çeşitli araştırmacılar tarafından SH deney sonuçları ile TEBD deney sonuçları arasında ve NYD deney sonuçları ile TEBD deney sonuçları arasında matematiksel ilişkilerin belirlendiğinden bahsedilmektedir. SH deneylerinden TEBD değerlerine ulaşmada Deere ve Miller (1966) tarafından önerilen abak (Şekil 9), en yaygın kullanılan yaklaşımdır. Bu çalışmada, kiltası kaya birimi için belirlenen yoğunluk değerlerinin 24-27 kN/m<sup>3</sup> arasında değiştiği belirlenmiştir. Ortalama yoğunluk değeri 25 kN/m<sup>3</sup> olduğu dikkate alınarak Şekil 9'dan kiltası kaya birimi için TEBD değerleri belirlenmiştir (Çizelge 7).

NYD deney sonuçları yardımıyla benzer şekilde dolaylı olarak TEBD değerlerine ulaşmaya olanak tanıyan birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların genel olarak doğrusal davranışa sahip olduğu görülmektedir (Eş. 1). Bu yaklaşımları topluca veren Akbay (2018), NYD değerlerinden TEBD değerlerine geçişte kullanılan dönüşüm katsayılarının (K) tüm kaya birimleri için 3-71 aralığında

değiştirdiğini vurgulamaktadır. Zayıf kayadan sağlam kayaya doğru gidildikçe bu dönüşüm katsayısının büyüdüğü görülmektedir. Zayıf kaya malzemesi için NYD ve TEBD arasındaki ilişkinin doğrusal yaklaşımlar yanında üssel davranış (Eş. 2) ile de açıklandığı dikkat çekmektedir (Akbaş, 2018).

Ülkemizde önemli kömür rezervi olan Soma, Seyitömer ve Tunçbilek kömür bölgelerinde karşılaşılan marn kaya birimi için Yenice (2002) tarafından yapılan çalışmada, NYD ile TEBD arasında istatistiksel korelasyon katsayısı (R) 0,95 olan üssel bir davranış olduğu vurgulanmaktadır. Benzer şekilde marn kaya birimi için üssel bir davranışın bulunduğu Tsiambaos ve Sabatakakis (2004) tarafından da vurgulanmıştır. Eşitlik 2 ile ifade edilen yaklaşımda K ve  $\beta$  dönüşüm katsayılarının sırası ile 24,39 ve 1,3189 olduğu Yenice (2002) tarafından belirtilmiştir (Eş. 3). Bu makalede sunulan çalışmada, üzerinde çalışılan kaya malzemesinin Tunçbilek kömür çevre kayacı olmasından dolayı, Eşitlik 3'ün kullanılmasına karar verilmiştir. Bu eşitlik yardımıyla belirlenen sonuçlar Çizelge 7'de sunulmuştur.

$$\text{TEBD} = K I_{s(50)} \quad (1)$$

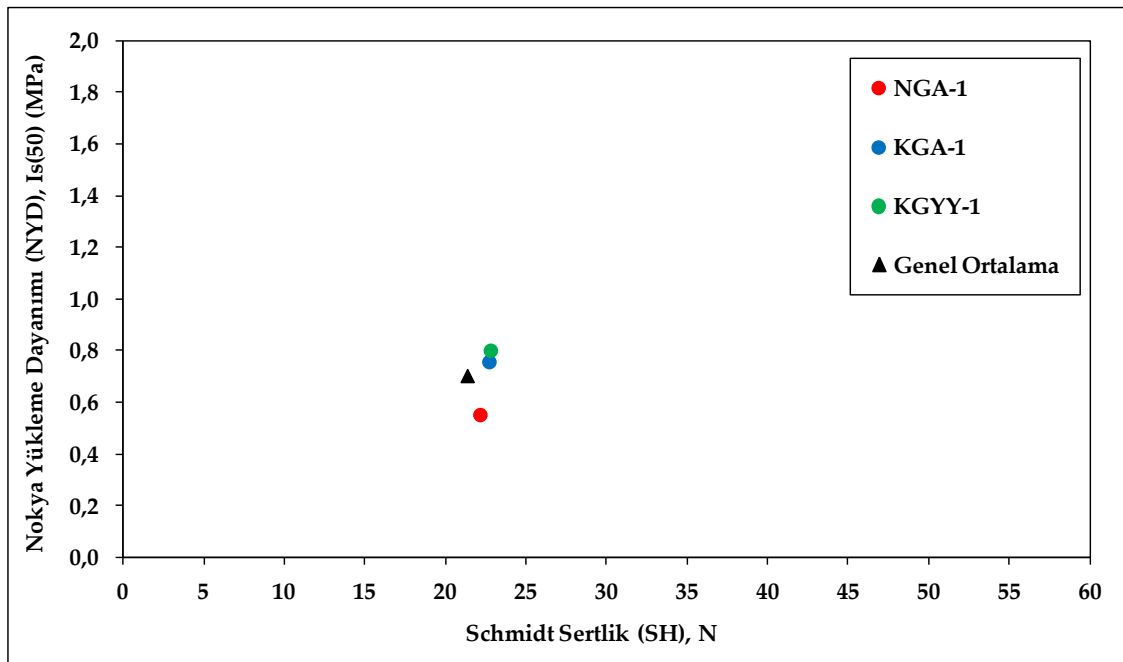
$$\text{TEBD} = K (I_{s(50)})^\beta \quad (2)$$

$$\text{TEBD} = 24,39 (I_{s(50)})^{1,3189} \quad (3)$$

Burada TEBD tek eksenli basma dayanımı (MPa),  $I_{s(50)}$  nokta yükleme dayanımı (MPa) değeridir.

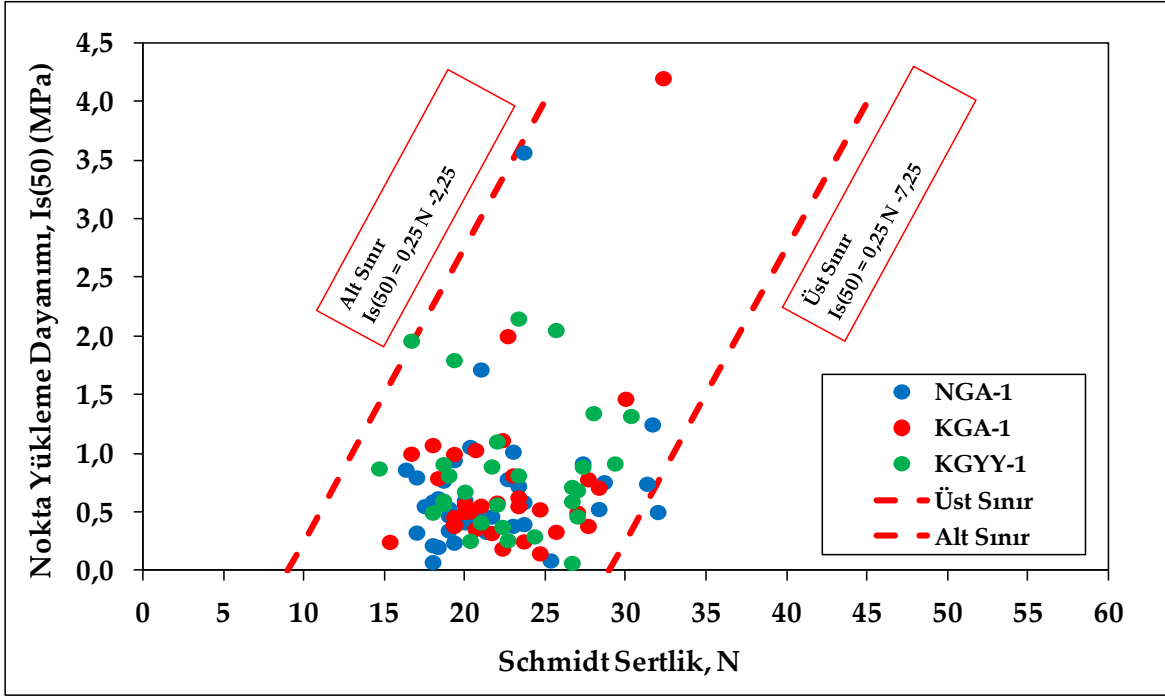
Çizelge 7'de sunulan sonuçlar incelendiğinde aynı ölçüm bölgelerinde SH deneyinden belirlenen TEBD değerleri ile NYD deney sonuçlarından belirlenen TEBD sonuçları arasında dikkat çekici bir fark olduğu görülmektedir. Bununla birlikte NYD yardımıyla belirlenerek Çizelge 7'de verilen TEBD değerlerinin, sınırlı sayıda yapılabilen gerçek TEBD deneylerinden belirlenen ortalama değerlere ( $7,84 \pm 3,69$  MPa) daha yakın olduğu görülmektedir (Çizelge 6).

Çizelge 7'de sunulan sonuçlar bir grafik üzerinde sunulmuştur. Şekil 10'da sunulan grafikte Çizelge 7 değerleri mavi renkli içi boş sembol ile gösterilmiştir. Şekil üzerinde görüldüğü üzere mavi renkli sembol ile ifade edilen noktalar referans doğrusunun oldukça altında kalmıştır. Eğer iki deney sonucundan bulunan TEBD değerleri yakın olsaydı değerler bu referans noktası üzerinde veya etrafında kümelenmiş olacaktı. Bu durum ayrıca tüm birim hücreler bazında da değerlendirilmiş ve Şekil 11 hazırlanmıştır. Tüm birim hücre değerleri içi boş mavi renkli semboller ile belirtilmiştir. Benzer şekilde tüm TEBD değerlerinin genel olarak referans doğrusunun altında konumlanmış olduğu görülmektedir.



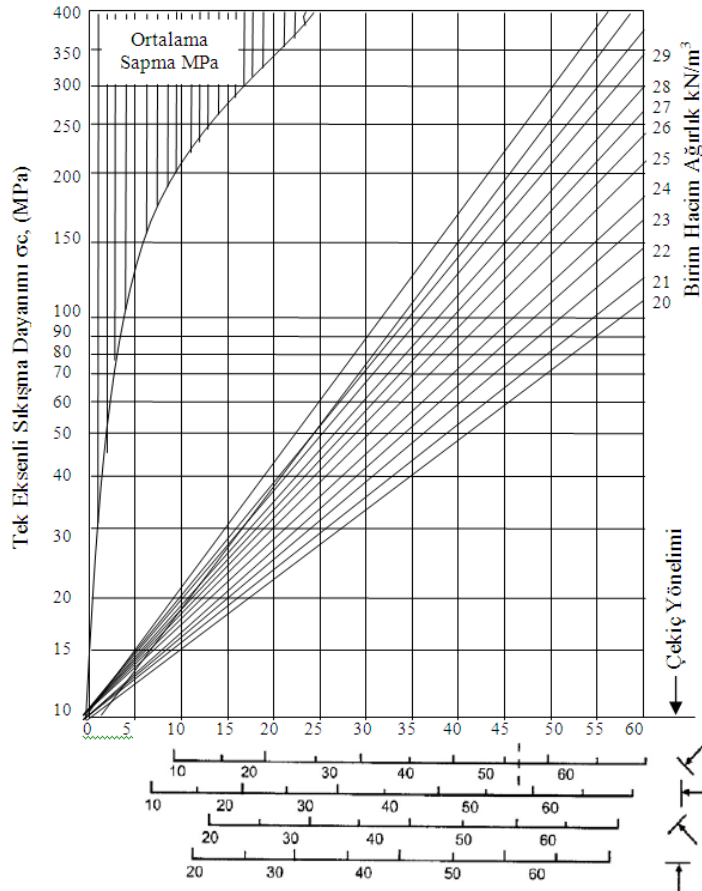
Şekil 7. Üç farklı bölgede gerçekleştirilen ortalama SH ve NYD deney sonuçları arasındaki ilişki

Figure 7. The relationship between average SH and NYD test results carried out in different three regions



Şekil 8. Üç farklı bölgenin 112 adet birim hücresinde gerçekleştirilen SH ve NYD deney sonuçları

Figure 8. SH and NYD test results carried out in 112 unit measurement region prepared in different three regions



Şekil 9. SH deney sonuçları yardımıyla TEBD değerini veren abak (Deere ve Miller, 1966)

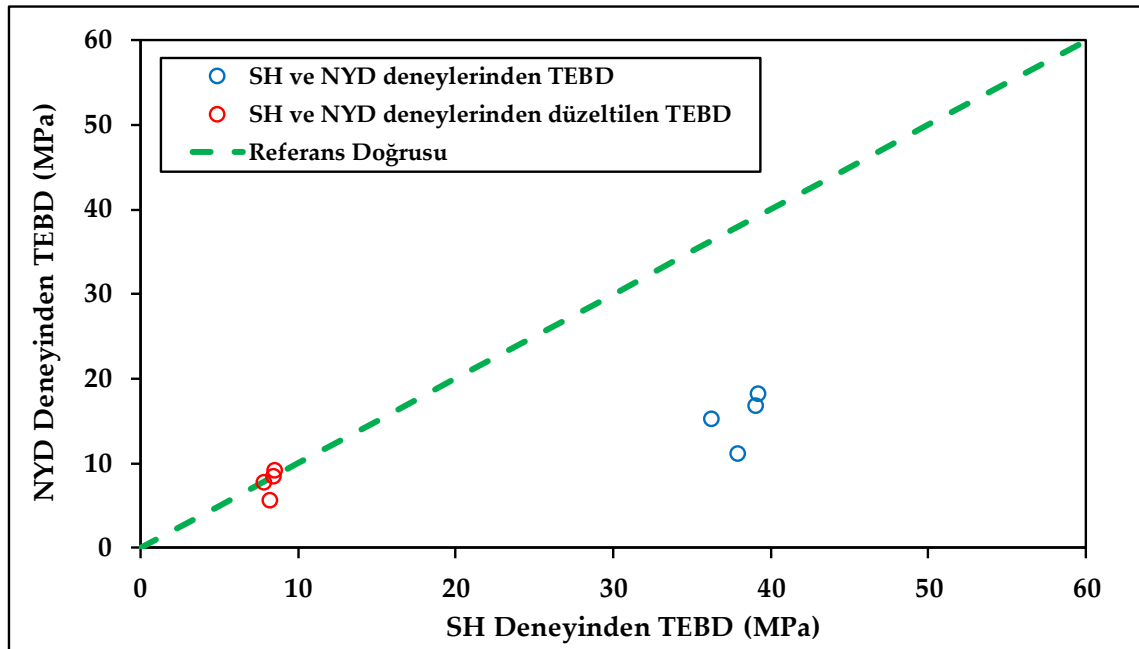
Figure 9. The chart given TEBD value by SH test results (Deere and Miller, 1966).

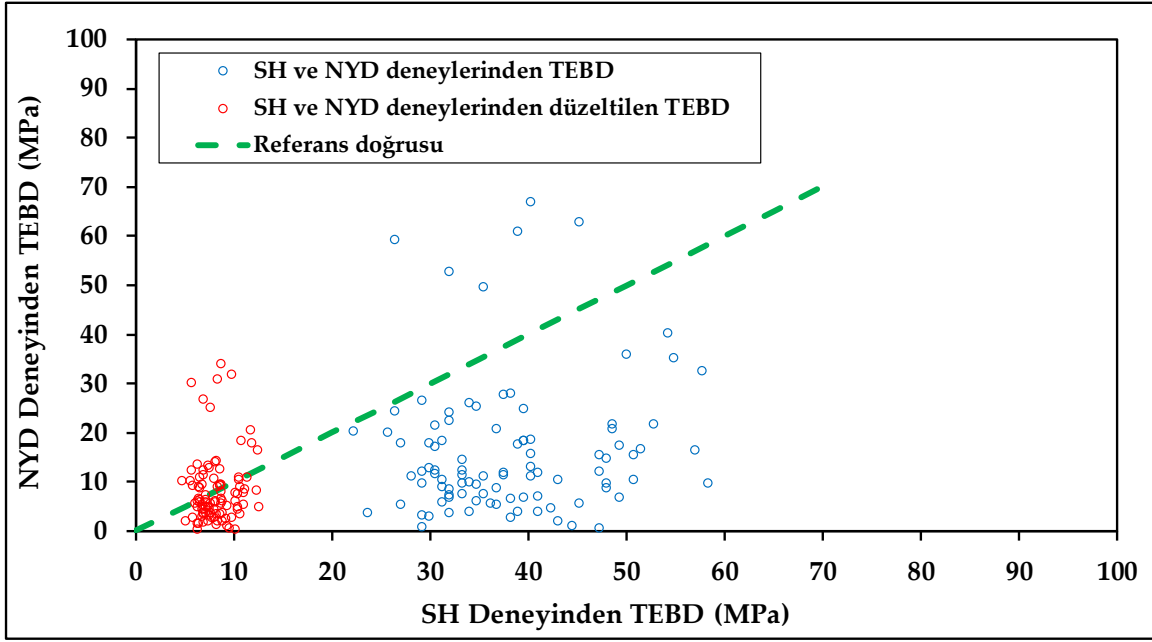


**Çizelge 7.** SH ve NYD deney sonuçları yardımıyla belirlenen TEBD değerleri*Table 7. TEBD values determined by SH and NYD test results*

| Ölçüm alanı                    | Ölçüm alanı tanımı | Deney alanı, $A_i$  | Birim ölçüm hücre adedi, S | SH deneyleri için optimum değerler (Çizelge 3 ve Şekil 9) |     |                     |                     | NYD deneyleri için optimum değerler (Çizelge 5 ve Eş. 3) |     |                      |                     |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|----------------------------|---|-----|---------------------|---------------------|--|-----|----------------------|---------------------|
|                                |                    |                     |                            | $A_i$   | S   | N                   | TEBD (Şekil 9'dan)  | $A_i$  | S   | $I_{s(50)}$          | TEBD (Eş. 3'den)    |
|                                |                    | ( $m^2$ )           | (#)                        | ( $m^2$ )   | (#) | (-)                 | (MPa)               | ( $m^2$ )  | (#) | (MPa)                | (MPa)               |
| Nakliye Galeri Arını (NGA)     | NGA-1              | 10,75               | 43                         | 3,75  | 15  | 22,14               | 37,86               | 8,25   | 33  | 0,553                | 11,17               |
|                                | NGA-2              | 7,25                | 29                         | 5,25  | 21  | 22,53               | 38,68               |  |     |                      |                     |
| Kılavuz Galeri Arını (KGA)     | KGA-1              | 10                  | 40                         | 6   | 24  | 22,70               | 39,03               | 8,5  | 34  | 0,758                | 16,92               |
|                                | KGA-2              | 8,25                | 33                         | 5,75  | 23  | 22,13               | 37,84               |  |     |                      |                     |
| Nakliye Galeri Yan Yüzü (NGYY) | NGYY-1             | 3,50                | 14                         | 2,5   | 10  | 19,27               | 31,87               |  |     |                      |                     |
|                                | NGYY-2             | 2,75                | 11                         | 2,75  | 11  | 18,66               | 30,59               |  |     |                      |                     |
|                                | NGYY-3             | 4,75                | 19                         | 4,25  | 17  | 23,12               | 39,91               |  |     |                      |                     |
|                                | NGYY-4             | 3                   | 12                         | 2,75  | 11  | 18,81               | 30,91               |  |     |                      |                     |
| Kılavuz Galeri Yan Yüzü (KGY)  | KGY-1              | 16,5<br>(7,25+9,25) | 66<br>(29+37)              | 3,0   | 12  | 22,79               | 39,22               | 5,5  | 22  | 0,802                | 18,23               |
| Toplam                         |                    | 66,75               | 267                        | 36  | 144 | $\pm 1,86$<br>(ort) | $\pm 3,88$<br>(ort) | 22,25  | 89  | $\pm 0,133$<br>(ort) | $\pm 3,76$<br>(ort) |

$A_i$  : Deney alanı, S : Birim hücre adedi, N : SH için deney sonucu,  $I_{s(50)}$  : NYD için deney sonucu, TEBD: Tek eksenli basma dayanımı.

**Şekil 10.** Ortalama SH ve NYD deney sonuçları ile belirlenen TEBD değerlerinin karşılaştırılması*Figure 10. The comparison of TEBD values determined by the average SH and NYD test results*



Şekil 11. Üç farklı bölgede gerçekleştirilen SH ve NYD deney sonuçları ile belirlenen TEBD değerleri  
 Figure 11. The TEBD values determined by SH and NYD test results carried out in different three regions

Sonuç olarak, SH deney sonuçları yardımıyla dolaylı yoldan TEBD değerlerine ulaşmada sıklıkla kullanılan abakın (Şekil 9), zayıf kayalar için sistematik olarak oldukça yüksek TEBD değerleri önerdiği kanaati oluşmuştur (Çizelge 6 ve Çizelge 7). Benzer şekilde NYD deneylerinden dolaylı yoldan belirlenen TEBD değerleri (Çizelge 7) ile Çizelge 6'da sunulan gerçek TEBD değerleri karşılaştırılmış, her iki değer birbirine SH'den üretilenlere göre daha yakın olduğu belirlenmiştir.

Her iki deney sonucunun verildiği Şekil 10 ve 11'deki mavi içi boş sembollerin referans doğrusundan uzak ve dağınık olması sonucu gündeme gelen düzeltme ihtiyacı bu çalışmadan elde edilen katsayılar ile yapılmaya çalışılmıştır. Çizelge 6'da verilen gerçek ortalama TEBD değeri (7,84 MPa), SH deneylerine bağlı olarak belirlenen ortalama TEBD değerine (36,21 MPa, Çizelge 7) oranlanmıştır. Belirlenen katsayının ( $k_{SH} = 0,22$ ), SH deneylerinden dolaylı yoldan belirlenen TEBD değerlerinin düzeltilmesinde kullanılmasına karar verilmiştir. Benzer şekilde gerçek ortalama TEBD değerinin (7,84 MPa), NYD deneylerinden elde edilen ortalama TEBD değerine (15,44 MPa) oranlanarak ulaşılan katsayı ( $k_{NYD} = 0,51$ ), NYD deney sonuçları ile dolaylı yoldan belirlenen TEBD değerlerinin düzeltilmesinde çarpan olarak kullanılmıştır. Burada ifade edilen düzeltmeler yapılarak elde edilen son değerler Şekil 10 ve 11'de içi boş kırmızı semboller ile gösterilmiştir. Şekil 10 ve 11'de içi boş kırmızı sembol değerleri örneğin NGA-1 bölgesi için SH deneylerinden elde edilen 37,86 MPa (Çizelge 7) değeri  $k_{SH} = 0,22$  çarpanı ile çarpılarak düzeltilmiş TEBD (8,33 MPa), NYD deneyi için elde edilen 11,17 MPa (Çizelge 7) değeri  $k_{NYD} = 0,51$  çarpanı ile çarpılarak düzeltilmiş TEBD (5,7 MPa) değerleri bulunmuştur. Şekil 10 ve 11'de düzeltilmiş TEBD değerlerinin referans doğrusunun etrafında kümeleştiği ve gerçek ortalama TEBD değerlerine (Çizelge 6) yaklaştığı görülmektedir. Bu düzeltme yönünde önerilen eşitlikler genelleştirilerek aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Düzeltilmiş } (TEBD)_{SH} = k_{SH} (TEBD)_{SH} \quad (4)$$

$$\text{Düzeltilmiş } (TEBD)_{NYD} = k_{NYD} (TEBD)_{NYD} \quad (5)$$

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

TKİ-GLİ-A6 panosunda, SH ölçüm çalışmaları için 9 farklı ölçüm alanında oluşturulan toplam 267 adet birim hücrede ve NYD ölçüm çalışmaları için üç farklı alanda hazırlanan toplam 112 adet birim hücrede gerçekleştirilen deneysel çalışmalara dayalı olarak elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Büyük ölçekli yüzeylerde gerçekleştirilen SH deneylerinin değerlendirmesinde;
  - i. ISRM (2007) herhangi bir öneride bulunamaz iken ASTM (1993) tarafından sadece deney uygulama noktaları arasında en az 15 cm olması gerektiği dışında herhangi bir öneri yapılmadığı belirlenmiştir. Özkan ve Bilim (2008) ve Mesutoğlu ve Özkan (2019) tarafından önerilen yaklaşım ile büyük yüzeyler 267 adet birim hücreye ( $a_i = 0,25 \text{ m}^2$ ) bölünmüştür.
  - ii. Her bir birim hücreden alınan değerlerin ilaveli ortalaması alınarak her bir ölçüm alanı için ayrı ayrı optimum birim hücre sayısı (S) ve ortalama SH değerleri belirlenmiştir. Tüm çalışma sahası için genel SH deney sonucu  $N = 21,35 \pm 1,86$  olarak belirlenmiştir.
  - iii. SH deney sonuçları, kullanılan kazıcı makine ve delici makine performanslarının tespitinde ayrıca uç tüketimlerinin önceden belirlenmesinde kullanılabilir. Tunçbilek yeraltı hazırlık çalışmalarında karşılaşılan kömür damarının tabantaşı olan kilitaşıda gerçekleştirilecek SH deneyleri için rastgele seçilen bir büyük ölçekli yüzey üzerinde ( $A_i$ ) hazırlanacak birim hücre sayısını (SH) verecek bir eşitlik geliştirilmiştir ( $S = 4A_i$ ).
2. Büyük ölçekli üç farklı yüzeyde gerçekleştirilen NYD deneylerinin değerlendirmesinde;
  - i. Saha çalışmalarında optimum sonuca ulaşmada en az kaç adet deneyin yapılacağı ISRM (2007) ve ASTM (1993) tarafından belirtilmemiştir. Bu çalışmada yüzey alanlarının bölünmesine karar verilmiştir. SH deney sonuçları ile karşılaştırmalar da yapmak amacıyla hazırlanan 112 adet birim hücrede ( $a_i = 0,25 \text{ m}^2$ ) NYD deneyleri gerçekleştirilmiştir.
  - ii. Her bir birim hücreden alınan değerlerin birikimli ortalaması alınarak ölçüm alanları için optimum birim hücre sayısı (S) ve ortalama NYD değerleri belirlenmiştir. Tüm çalışma sahası için genel NYD deney sonucu  $I_{s(50)} = 0,704 \pm 0,133 \text{ MPa}$  olarak belirlenmiştir.
  - iii. Tabantaşında gerçekleştirilmesi planlanan bir NYD deneyi için rastgele seçilecek büyük bir ölçekli yüzey üzerinde ( $A_i$ ) hazırlanacak birim hücre sayısını (S) verecek bir eşitlik geliştirilmiştir ( $S=4A_i$ ). Bu deney sonuçları kazıcı makine performanslarının belirlenmesinde kullanılabilir.
3. Sınırlı sayıda hazırlanan küp örnekler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basma dayanımı deneylerinden ortalama TEBD değerlerinin  $\sigma_c = 7,84 \pm 3,69 \text{ MPa}$  olduğu belirlenmiştir.
4. Üç farklı deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler;
  - i. Tek eksenli basma dayanımı (TEBD) deneyi için örnek hazırlamada karşılaşılan zorluklar nedeni ile ortaya atılan SH ve NYD deneylerinden dolayı olarak belirlenen TEBD değerlerinin birbirleri ile örtüşmediği anlaşılmıştır.
  - ii. Dokuz farklı ölçüm alanında gerçekleştirilen SH deney sonuçlarına bağlı olarak dolaylı yoldan hesaplanan TEBD değerlerinin gerçek TEBD değerlerden oldukça büyük olduğu tespit edilmiştir.
  - iii. Üç farklı ölçüm alanında gerçekleştirilen NYD deney sonuçlarına dayalı olarak dolaylı yoldan hesaplanan TEBD değerlerinin gerçek TEBD değerlerine SH'den elde edilenlere göre daha yakın olduğu görülmüştür.
  - iv. SH ve NYD deney sonuçları yardımıyla belirlenen TEBD değerlerinin düzeltilmesi için sırasıyla  $k_{SH} = 0,22$  ve  $k_{NYD} = 0,51$  çarpanlarının kullanımı önerilmiştir. Ancak bu katsayılar ilgili sahada mevcut kilitaşı kaya birimi için geçerli olup, diğer kaya birimleri içinde benzer çalışmaların yapılması gereklidir.
  - v. Bu çalışmada önerilen yaklaşım ile her iki deney sonuçlarından ulaşılan TEBD değerlerinin düzeltilmesi sonucunda belirlenen TEBD değerlerinin referans doğrusu etrafında kümeleştiği ve aynı zamanda gerçek ortalama TEBD değerine yaklaştığı tespit edilmiştir.
5. Bu makale çalışması ile önerilen yaklaşım yardımıyla saha mühendisleri, yerinde NYD ve SH deneylerinin planlamasında rastgele seçtikleri büyük ölçekli yüzeylerde ( $A_i$ ), optimum kaç tane birim hücre (S) oluşturacakları ve kaç tane deney yapacaklarını belirleyebileceklerdir.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)**

Saha çalışmalarının yürütüldüğü TKİ-GLİ İşletme Müdürlüğüne, saha mühendislerine, çalışmalara 116M698 nolu proje ile destek veren TÜBİTAK'a ve makale değerlendirmesinde bulunan hakemlere yazarlar teşekkürlerini sunarlar.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Akbay, D., 2018, Nokta yükleme deneyinde yapılan hataların giderilmesi için yeni bir deney düzeneğinin tasarlanması, Süleyman Demirel Üniversitesi-FBE, Maden Mühendisliği ABD, Doktora Tezi, 218s.
- ASTM, 1993, Rock Testing Handbook, Test Standards, ASTM Publication, 947 p.
- Barton, N., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Elsevier, Amsterdam, Cilt 7, ss. 287-332. Also NGI Publ. 105, 1974.
- Bieniawski, Z. T., 1975, Point load in geotechnical practice, *Eng. Geol.* 9: 1-11.
- Broch, E., Franklin, J. A., 1972, The point load strength test", *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 9: 669-697.
- Chau, K.T., Wong, R. H. C., 1996, Uniaxial compressive strength and point load strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 33: 183-189.
- Deere, DU, Miller, RP, 1966. Engineering classifications and index properties of intact rock, Tech. Report No. AFWL-TR 65-116, University of Illinois
- Hawkins, A. B., 1998, Aspects of rock strength, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *Bull Eng Geol Env.*, 57 : 17-30
- ISRM, 2007, The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006, International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods, Editor: R. Ulusay and John A. Hudson , ISBN: 978-975-93675-4-1, 628p.
- Kahraman, S., 2001, Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, *International Journal of Rock Mechanics*, 981-994.
- Mesutoğlu M., Özkan İ., 2019, In-situ application of Schmidt hammer test on a coal face with large-scale, ISRM 14th International Congress on Rock Mechanics, 13-18 Eylül 2019, Foz do Igaçu-Brasil, Code:14287, 8p.
- Özkan, I., Bilim, N., 2008, A new approach for applying the in-situ Schmidt hammer test on a coal face, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Cilt 45, No 6, ss. 888-898.
- Özkan, İ., 1989, Determination of classification parameters for weak and stratified rocks based on RMR and Q-systems, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, 156s.
- Öztürk, C. A., Özbakır, A. D., Nasuf, E., 2004, Nokta yük ve tek eksenli basınç dayanımları arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi, 6. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu.
- Peng, S. S. and Chiang, H. S., 1984. Longwall Mining. John Wiley & Sons, New York.
- Tsiambaos, G., Sabatakakis, N., 2004. Considerations on strength of intact sedimentary rocks. *Engineering Geology* 72, 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.10.001>
- Ulusay, R., Özkan, İ. ve Ünal, E., 1995, Characterization of weak, stratified and clay bearing rock masses for engineering applications. Fractured and Jointed Rock Masses Conference, June 3-5, 1992, L.R. Mayer, N.W. Cook, R.E. Goodman and C.F. Tsang (eds.), Lake Tahoe, California, A.A. Balkema, ss. 233-240.
- Yenice, H., 2002. Bazı Kayaçların Tek Eksenli Basınç Dayanımları ile Diğer Malzeme Özellikleri Arasındaki İlişkiler. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 4, 65-71.



## WORKLOAD CHARACTERIZATION OF TELECOM SOFTWARE

<sup>1</sup>Osman Ferit ÜNLÜ, <sup>2</sup>Pınar BÖLÜK

<sup>1</sup>ferit\_osman.unlu@nokia.com, <sup>2</sup>pinar.sarisaray@eng.bau.edu.tr

<sup>1</sup>Nokia Research and Development Center, Istanbul, TURKEY

<sup>2</sup>Computer Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Bahçeşehir University, Istanbul, TURKEY

(Geliş/Received: 01.03.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 30.07.2019)

**ABSTRACT:** Telecom software systems are a major aspect of telecommunications networks used for managing, administrating, auditing and monitoring purposes. One of the most significant features is the performance of the telecom software system, since there is a great variety of network elements in use within built systems through which the telecom software interacts. Workload characterization is an essential methodology for simulating load usage for a given infrastructure that is exposed to a production environment. Hence, exploring the characteristics of workloads well leads an increase on system efficiency and performance. Nevertheless, workload characterization has not been well examined yet for Telecom Software System. In this paper, a new workload characterization architecture is proposed and implemented to model the workload and simulate the behavior of the network element. This architecture provides information regarding the accuracy of the workload models for more precise performance testing. Additionally, we verify our workload characterization results obtained from our architecture in a real software system. Performance results show that proposed workload model-based simulation environment is promising to predict the performance of the software systems.

**Key Words:** *workload, clustering, workload characterization, trace-based simulation*

### Telekom Yazılımı İş Yüğü Karakterizasyonu

**ÖZ:** Telekom yazılım sistemleri, yönetim, denetim ve izleme amacıyla kullanılan telekomünikasyon ağlarının önemli bir parçasıdır. Telekom yazılım sistemlerinin en önemli özelliklerinden biri performansdır. Bunun nedeni telekom yazılımının etkileşim içinde olduğu yerleşik sistemler içinde kullanılan çok farklı ağ elemanları vardır. İş yüğü karakterizasyonu, üretim ortamına maruz kalan belirli bir altyapı için yük kullanımını simüle etmek için temel bir metodolojidir. Bu nedenle, iş yüklerinin özelliklerini iyi araştırmak, sistem verimliliği ve performansında artışa neden olmaktadır. Bununla birlikte, literatürde iş yüğü karakterizasyonunun Telekom Yazılım Sistemlerinin performansına etkileri henüz iyi bir şekilde incelenmemiştir. Bu yazıda, iş yükünü modellemek ve ağ elemanının davranışını simüle etmek için yeni bir iş yüğü karakterizasyon mimarisi önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu mimari, daha yüksek doğrulukta performans testleri için iş yüğü modellerinin doğruluğu hakkında bilgi sağlamaktadır. Ek olarak, çalışma da önerilen mimariden elde edilen iş yüğü karakterizasyon sonuçları gerçek bir yazılım sistemi ile doğrulanmaktadır. Performans sonuçları, önerilen iş yüğü modeline dayalı simülasyon ortamının yazılım sistemlerinin performansını öngörmeyi vaat ettiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** İş yüğü, kümeleme, iş yüğü karakterizasyonu, iz tabanlı simülasyon

## INTRODUCTION

A workload can be defined as a set of requests that a system receives as an input over a certain period of time (Shirasb, 1983). To detect the performance of any system-i.e., the requests processed by the system-its workload must be analyzed. The input requests arrive into the system from external sources. This generic unit of work is called a "workload component". Workload components include transactions, interactive commands, processes and http requests, depending on the nature of the service provided. The workload parameters that are required for workload characterization are obtained from the workload components. Workload parameters are the measured quantities, service requests, or resource demands, etc. Examples of workload parameters include instructions, transaction types, packet sizes, page reference patterns and source-destinations of a packet. Workload component and parameter selection plays a key role in workload characterization. The workload component must represent as homogeneous a group as possible, and parameters that have little effect must be excluded. The system domain is important to the workload component since the component itself can be selected according to the domain. Operating system-level parameters, such as CPU time, cannot be used; instead, parameters that depend on the workload itself are selected.

A major problem for performance testing is the use of unrealistic workloads, which lead to incorrect, inefficient performance results (Jain, 2008). Such badly measured or mis-measured performance results could lead to performance problems and failures with "production", or in other words, the "live" environment. Hence, an efficient workload characterization is a vital issue for regulating efficient resource provisioning, power management and energy conservation strategies within a technological infrastructure (Feitelson, 2014). The workload models that derive from the characterization process play also an important role in performance testing. The main fields in which workload characterization is practiced are the web, online social networks, video services, mobile devices and the cloud systems (Avritzer *et al.*, 2002; Calzarossa *et al.*, 2016).

In this study, we present a new workload characterization architecture which model the workload and then simulate the behavior of the network element for a Telecom software system. In the architecture, we utilize different clustering techniques to characterize workload. Then, the effect of clustering accuracy on the performance has been analyzed in terms of CPU usage, memory and Disc I/O. We adapt "measurement-based" technique which is given in (Franks *et al.*, 2007) for performance modeling to predict future loads of a software system. This architecture also provides accuracy for the characterization of more precise workload models and the accuracy effect on the performance results is also studied. Furthermore, we have developed a new software system named PAS (Parameter Audit SmartApp) to explore the performance of the proposed workload characterization architecture in real test environment. The effect of clustering accuracy on performance testing has been shown for workload characterization. To the best of our knowledge, workload characterization methodologies have not yet been applied or studied in relation to software architectures that operate within the telecom domain.

The rest of the paper is organized as follows; Section 2 describes the existing literature relating to workload characterization techniques. In Section 3, we show how we characterized the telecom log data and outlines of the architecture is shown. Performance results of clustering techniques are given in Section 4. Section 5 presents the effect of workload characterization performance on resource utilization. Finally, Conclusion is given in Section 6.

## RELATED WORK

Workload characterization analysis techniques vary from statistical, Markov models, Principal component analysis, histograms (single and multi-parameter) to clustering (Calzarossa *et al.*, 2016). Statistical methods include median, mode and averaging operations to characterize workload in the system. The averaging method is used when the average value of a parameter can be considered its basic characterization. The median and mode formulations are used in addition to the arithmetic mean. This methodology functions well with good uniform distributions or gross studies (Feitelson and Rudolph,

1996). The specifying dispersion method is used when most of the parameters is non-uniform. Variance or standard deviation specifications can be a major improvement over the average. Both average and standard deviation allow workloads to be grouped into classes, but this still ignores the exact distribution (Tietjen, 1986). Markov models are used when distribution is not enough, meaning that requests can be received by a system in sequences and the sequencing affects performance. Markov models represent models as a state diagram and show probabilistic transitions between states. Request generation is based on these transitions. When creating a Markov model, a long string of activities is observed. A matrix is used to count pairs of states. The matrix rows must be normalized to sum to 1.0 (Neuts, 1989). Clustering technique has been used for workload characterization task (Saraswathi and Sheela, 2014; Menasce *et al.*, 1996; Gruttner *et al.*, 2015; Xu and Tian, 2015). The main objective when applying clustering algorithms is to classify requests into a smaller group of classes to create similar workloads to those on the production side. During the process of workload characterization of a system, log files are analyzed, and a clustering algorithm is applied. This classification is made based on a widely used clustering algorithm, such as the connectivity-based (hierarchical), centroid-based or density-based algorithms (Saraswathi and Sheela, 2014).

There are several workload characterization implementations are applied on different software domains such as mass storage systems (Menasce *et al.*, 1996), embedded software (Gruttner *et al.*, 2015), and parallel scientific programs (Helm and Malony, 2001).

WESSBAS (Hasselbring *et al.*, 2008; Hasselbring *et al.*, 2014) is a model-driven approach for automatically expositing and transforming workload models for the load testing and performance prediction of session-based applications. This approach is extended with WESSBASS-DSL, which can define the layered modeling of workload specifications for the Palladio component model (Hasselbring *et al.*, 2014). Casalicchio *et al.* (2015) has proposed a workload characterization based on three months of the real traffic and resource usage of Desktop-as-a-Service. The cloud desktop service workload and the cloud storage service workload are defined as representative workloads. As reported in this study, workload characterizations such as session length could be modelled with exponential distribution, while CPU load and disk load (R/W) are longtail distributed. Feitelson and Zakay (2014) describe a workload characterization method based on real traces, which are divided into sub-traces to represent different users. The re-sampling is applied in various ways and collected over daily and weekly periods. Amrehn *et al.* (2015) presents an automated workload characterization approach for I/O-intensive software applications in virtualized environments. Storage request properties are extracted via monitoring tools, with a proposed algorithm defining the workload models. Workload migration and consolidation cases have also been studied in this work.

The customer behavior model graph (CBMG) technique has been applied as a workload characterization methodology in (Almeida *et al.*, 1999). The CBMG technique is likewise implemented for automated workload characterization using system log analysis in (Daniel and Mahmoud, 2015). The authors have enhanced its implementation by using ELK as a technology stack, to achieve greater efficiency and generalness. This technique is also used in (Politi *et al.*, 2004). Gruttner *et al.* (2015) has proposed a hybrid approach to defining automatic workload models for embedded software performance estimation. From CPU usage and memory access patterns, embedded software workload models are extracted and used for host-based simulation. Simulation results are obtained from WCET benchmarks. Curiel and Pont (2018) describe new innovations in the WWW that involve dealing with more complex workload models. This survey summarizes and provides guidelines for these challenges. Some recent studies have also applied these approaches on other software architectures, like microservices. Nakaike *et al.*'s (2016) study is the first empirical study on the performance analysis of microservices; it constitutes important research, as it shows that the microservice architecture consumes more resources due to its monolithic approach. ACME Air, a public benchmark, is used for the experimental results.

Although there are several workload characterization implementations in software domains, none of them has been dealt with the real telecom data. In this paper we propose a workload characterization

methodology on telecom data which uses several clustering techniques. We also utilize a software tool named PAS to verify of our performance results in a real log data.

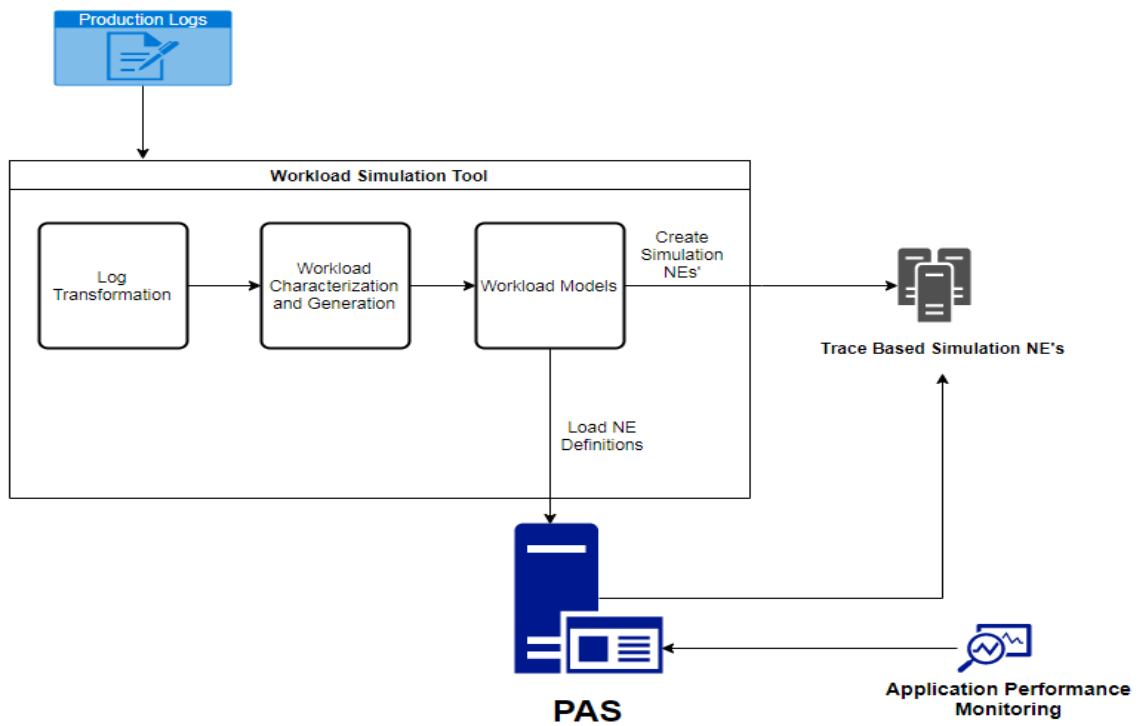
## PROPOSED ARCHITECTURE

In this section, we present our workload characterization architecture which is given in Figure 1. Our architecture includes Production Logs, Workload Simulation Tool, PAS (Parameter Audit SmartApp) and Trace based Simulation modules. PAS is a software tool that supports the automated auditing of network elements' configurable parameters. Using its network element-specific software modules, or "communicators", PAS collects data from network elements over secure connections (Goren *et al.*, 2017). The PAS tool logs both the data requested by a network element (*NE*) and the response coming from it, along with the total audit completion time. Each audit for a specific network element has specific retrieval mechanisms, and for every retrieval request, the response output varies. Due to the characteristics of the PAS tool, the key parameters for workload component can be identified as:

- Network element type,
- Total number of retrieval commands per audit,
- Total data exchange volume (transmitted between NEs and PAS) per audit,
- Total completion time per audit.

This modeling of the key parameters step is important for telecom software systems. The main duty of telecom software systems are to communicate with network elements for auditing, administration and monitoring purposes. Key values for PAS can be changed to request-based terminology to deal with generic definition. Once the identification step of key parameters is completed, data files (log files) are collected for a given period. Workload characterization and Generation is based on clustering algorithms applied to extracted key parameters. As every workload is characterized by a group of features (key parameters), clustering algorithms are appropriate methods to identify the number of clusters in the workload. The workloads placed in the same cluster are merged to obtain a core model of the workloads. Once the workloads have been defined based on clustering, the selected core models are given to PAS, and the network element simulations are initiated. Along with the cluster results, selected cluster member is used as a workload model for the trace-based simulated network elements. The simulation lists all the network elements, along with detailed information like network element name, network port, network element log file and assigned network element IP. The trace-based simulations are defined to PAS via a web service API. The trace-based network elements are initiated with their assigned IPs and ports. Performance tests can be started once this operation is complete. The trace-based simulator is a simulation tool developed by Nokia Turkey Research and Development Center to mimic the network element behavior for testing purposes (Celik *et al.*, 2015). This simulator is integrated into the workload simulation to enable the creation of the network elements needed for workload testing without the need for actual NEs or NE configuration.





**Figure 1.** Workload characterization architecture

For user interactions, a graphical user interface (GUI) is implemented as a Java Swing application (Java).

For clustering algorithm implementation, the WEKA software API is used (WEKA). We used F-measure and accuracy metric to represent the performance of clustering. The F-measure is a metric of accuracy based on the calculated precision (P) and recall (R) values. The F-measure formulation is given Eq 1.:

$$F = 2 \times \frac{P \times R}{P + R} \quad (1)$$

## CLUSTER RESULT ANALYSIS

The cluster result analysis is performed on a total of 500 network element audit log files. The log instances are labeled in the different cluster results according to certain predefined cluster number (K) parameters: K=3, 4 and 5. The result analysis is applied on the actual label set of the log files.

**Table 1.** Comparison for the number of clusters K=3

| Algorithms               | Accuracy | F-Measure | Time Taken | Instances                                   |
|--------------------------|----------|-----------|------------|---|
| K-Means                  | 49.4%    | 52.1%     | 0.085      | 0: 87 (17%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 309 (62%) |
| EM Clustering            | 47.8%    | 50.6%     | 0.12       | 0: 102 (20%)<br>1: 300 (60%)<br>2: 98 (20%) |
| Hierarchical Clustering  | 43.4%    | 45.2%     | 0.14       | 0: 386 (77%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 10 (2%)  |
| Density-Based Clustering | 49.4%    | 52.1%     | 0.21       | 0: 89 (18%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 307 (61%) |

Table 1 shows that K-means and density-based clustering algorithms has the higher accuracy and F-measure results when the number of clusters k is 3. It also shows that K-means has the lowest computational time among other algorithms. Density based clustering algorithm has the highest computational time despite having close accuracy and F-measure values to K-means. Hierarchical clustering algorithm has the lowest accuracy and F-measure values which is also can be seen by cluster instance member difference. Since the cluster instance number is limited with 3, there is no clear distinction between clustering algorithms.

**Table 2.** Comparison for the number of clusters K=4

| Algorithms               | Accuracy | F-Measure | Time Taken | Instances   |
|--------------------------|----------|-----------|------------|---|
| K-Means                  | 69.2 %   | 72.4%     | 0.092      | 0: 87 (17%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 103 (21%)<br>3: 206 (41%) |
| EM Clustering            | 56.6%    | 60.4%     | 0.21       | 0: 265 (53%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 77 (15%)<br>3: 54 (11%)  |
| Hierarchical Clustering  | 51.2%    | 52.4%     | 0.18       | 0: 347 (69%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 39 (8%)<br>3: 10 (2%)    |
| Density-Based Clustering | 68.6%    | 70.9%     | 0.28       | 0: 89 (18%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 101 (20%)<br>3: 206 (41%) |

Table 2 shows that all clustering algorithms shows higher accuracy and F-measure values with 4 cluster instances. K-means algorithm still shows the highest accuracy and F-measure values with lowest computational time. Density based clustering algorithm has the highest computational time as it was with 3 cluster instances. As the cluster instance number increases, F-measure and accuracy difference hierarchical clustering presents wors performance compared to the other algorithms.

**Table 3.** Comparison for the number of clusters K=5

| Algorithms               | Accuracy | F-Measure | Time Taken | Instances  |
|--------------------------|----------|-----------|------------|--|
| K-Means                  | 77%      | 82.2%     | 0.14       | 0: 77 (15%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 103 (21%)<br>3: 167(33%)<br>4: 49(10%)   |
| EM Clustering            | 59.2%    | 61%       | 0.28       | 0: 269 (54%)<br>1: 39 (8%)<br>2: 104 (21%)<br>3: 78 (16%)<br>4: 10 (2%)    |
| Hierarchical Clustering  | 59.2%    | 61.1%     | 0.21       | 0: 270 (54%)<br>1: 77 (15%)<br>2: 104 (21%)<br>3: 39 (8%)<br>4: 10 (2%)    |
| Density-Based Clustering | 76.6%    | 81.8%     | 0.36       | 0: 77 (15%)<br>1: 104 (21%)<br>2: 103 (21%)<br>3: 165 (33%)<br>4: 51 (10%) |

Density-based clustering tended to show an increased rate of accuracy and F-measure values as the number of clusters increased. Hierarchical clustering had the disadvantage of not being able to undo cluster member changes, which resulted in worse performance results. As the number of clusters increases, the difference in accuracy performance and execution time increases between K-means and density-based algorithms versus EM and hierarchical clustering algorithm. Table 3 results also fits the previous table results which fulfills the overall cluster analysis. To characterize workload models accurately, accuracy and f-measure values are also taken into consideration while creating workload models and performance results.

Figure 2 and Figure 3 also show accuracy and f-measure comparison of K-Means, EM, Hierarchical and Density based Clustering methods for varying number of clusters. The Figures also verify that, K-means algorithm shows higher accuracy performance with an increase in the number of clusters, the algorithms perform with higher accuracy performance and a higher execution time. The partitioning clustering algorithm (K-means) also demonstrated a more accurate performance and lower execution time when compared to the EM, density-based and hierarchical clustering algorithms.

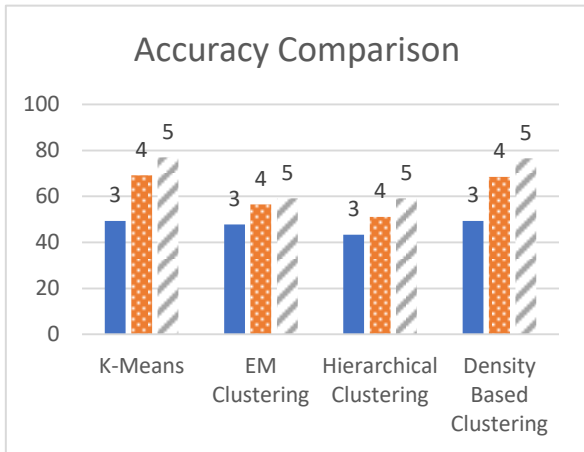


Figure 2. Accuracy comparison

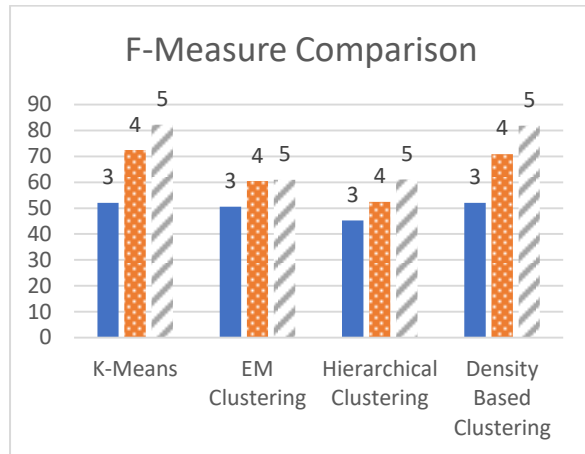


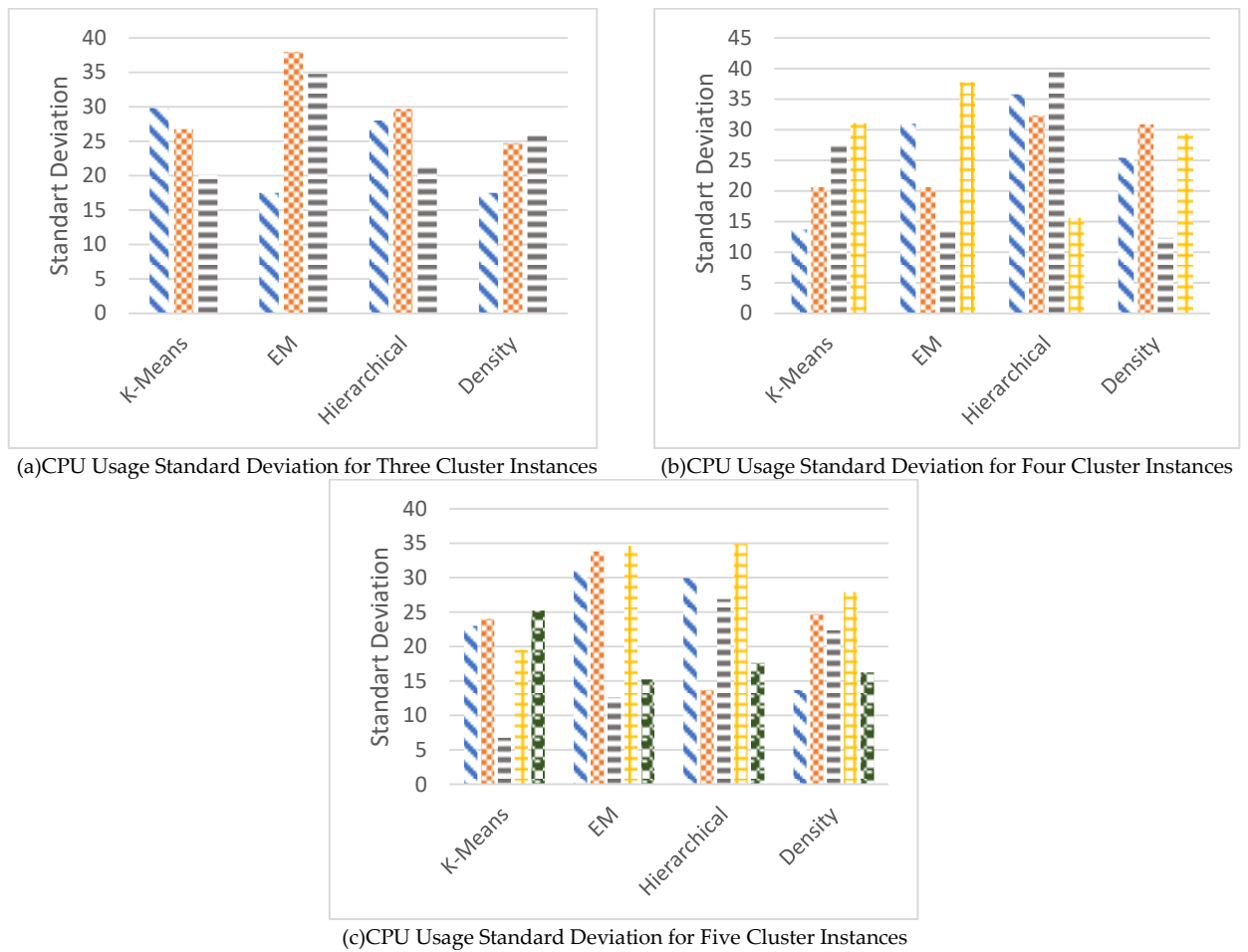
Figure 3. F-Measure comparison

**RESOURCE UTILIZATION**

In this Section, we present the effect of workload characterization performance on resource utilization. in terms of CPU and Memory and DISC I/O usage. Depending on the accuracy results, the best workload model is defined for our software system (PAS) and then trace-based network element simulators are configured by considering its performance.

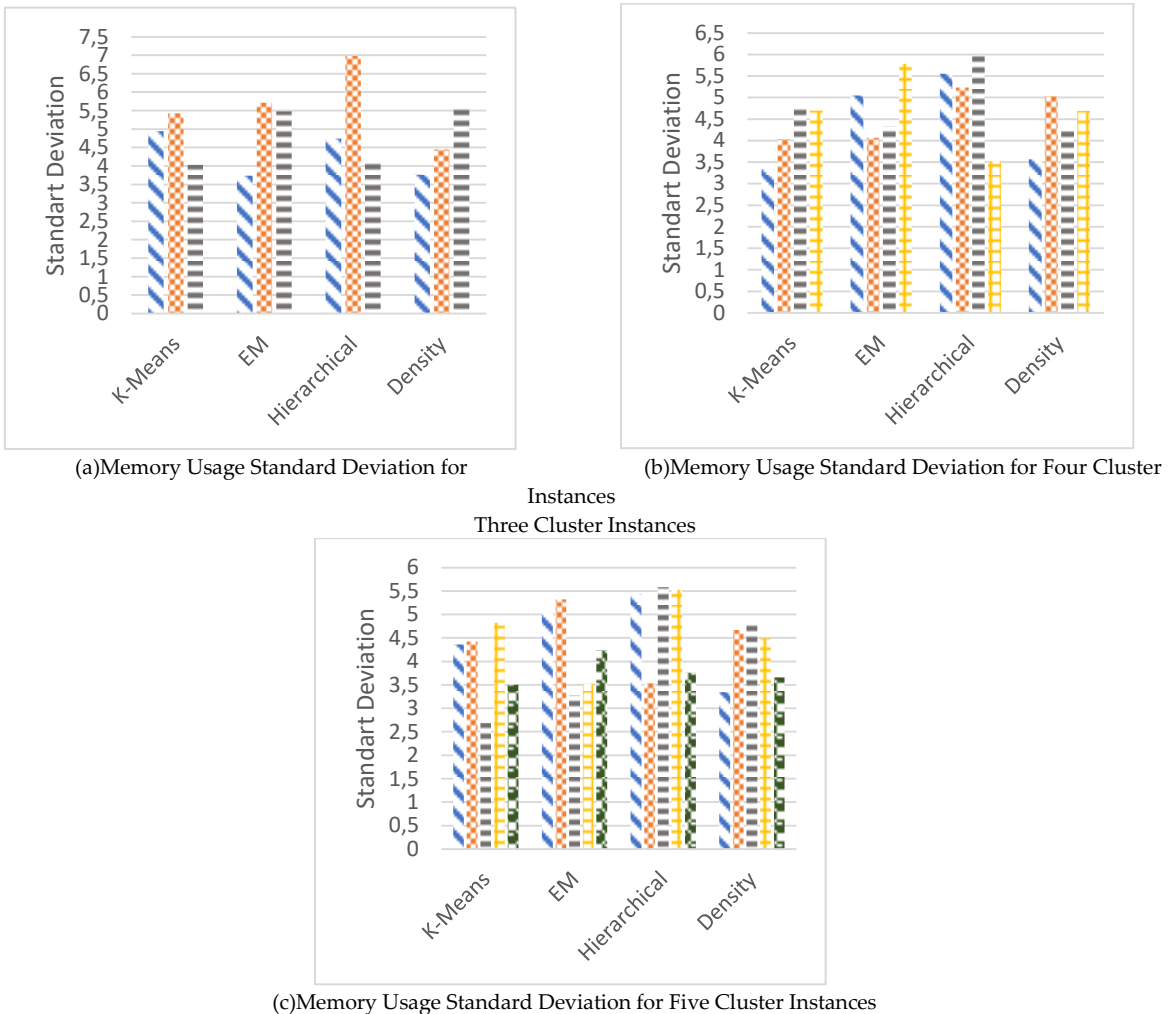
**CPU and Memory Usage**

CPU and memory data are collected while an audit job employed in network elements is running for each cluster instance. These resource usage characteristics are depicted according to the standard deviation of the CPU and memory usages. As shown in Figure 4, as the accuracy of the cluster increases, the derivation of the graph decreases. This result can be interpreted as follows: a greater number of network elements having these characteristics results in the same usage patterns for CPU and memory.



**Figure 4.** CPU usage standard deviation

Figure 4.a shows the three-instance cluster CPU result tests, based on density, K-means and hierarchical clustering result workloads, which tend to show lower standard deviation values compared to EM. As the accuracy of the clusters are close to each other, standard deviations of the resource usage for different clustering methods will be nearly same. Figure 4.b shows the four-instance cluster CPU test results. The K-means and density clustering result workloads show lower standard deviation values compared to EM and hierarchical clustering. The accuracy levels of the clusters are differentiated, which results in lower standard deviation values as well. Figure 4.c represents the five-instance cluster CPU test results. The accuracy difference being higher for both the three- and four-instance cluster results for K-means and density clustering as opposed to EM and hierarchical clustering has an adverse effect on the standard deviation values. Figure 5 shows standard deviation values of the memory usage. The results are calculated for workloads obtained from each cluster instance. Figure 5.a presents that the K-means and density clustering workloads produce lower memory standard deviation values when compared to EM and hierarchical. Figure 5.b shows the related results. As a relevant result for CPU usage, the memory usage standard deviation values are lower for the K-means and density clustering result workload models. As the accuracy of the cluster results become higher, characteristically close network elements are formed into cluster members. Figure 5.c shows the memory usage standard deviation results for five cluster instance results.

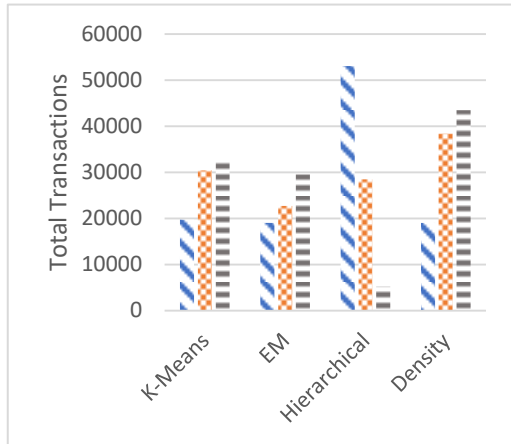


**Figure 5.** Memory usage standard deviation

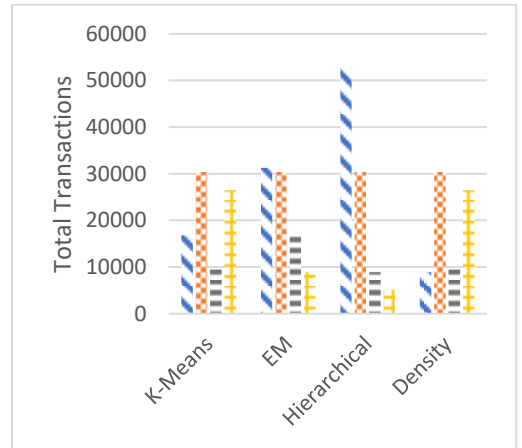
The CPU and memory usage graphs were checked for standard deviations to compare the differences between cluster instances for each clustering algorithm. Our performance results show that, standard deviation values decrease as the accuracy of the clusters increase. This was an expected outcome as PAS software performance tests are run against network elements, which are members of a cluster instance. For CPU and memory usage, this means PAS audits are completed for network elements, which have the same kind of data to be processed. As an example, when a network element returns a bulk configuration data response for a retrieval, this requires more computing resources for the processed data. When a network element's response data type varies within a cluster instance, this results in a high standard deviation value for the CPU and memory usage. PAS software resource usage will differ between audit jobs for network elements with bulk configuration data and for network elements with key-value-type configuration data. These results are important for two reasons: firstly, if performance tests are completed against more accurate workloads, this will provide overall PAS software resource usage information when a group of network elements with bulk configuration data are compared with network elements with key-value configuration data. This information is essential to the analysis of software architects as it can contribute to the simulation of a [particular] production environment. Second, graphs representing resource usage change for both CPU and memory can provide more precise results to analyze. Software architects can further investigate aspects of the resource usage behavior of this performance output software, such as resource usage pick points, etc.

**DISC I/O Usage**

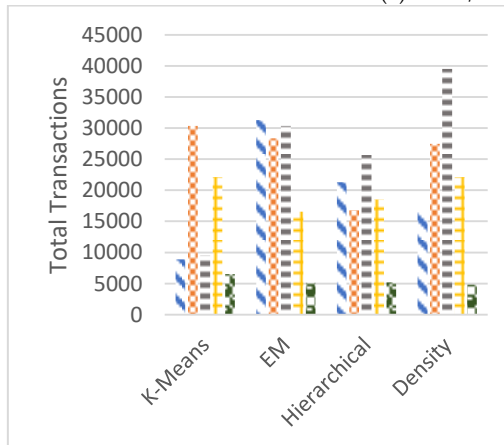
Disc I/O data-i.e., data transfer between the hard disc and RAM-are collected based on the total transactions for a selected cluster result of an audit. The correlation between the accuracy of a cluster and the disc I/O total transactions can be seen in the graphs below. As the cluster accuracy increases, the disc I/O usage difference between the clusters varies. The higher disc I/O usage difference situation occurs with the hierarchical clustering for three and four cluster instances. The disc I/O usage details are listed below.



(a)DISC I/O Transactions for Three Cluster Instances



(b)DISC I/O Transactions for Four Cluster Instances



(c)DISC I/O Transactions for Five Cluster Instances

**Figure 6.** Disc I/O transactions

The hierarchical clustering workload model results have the highest difference between cluster instances. When compared with accuracy levels, this cannot be explained by characteristically close network elements being in the same cluster; this is the result of a higher number of network elements being members of the same hierarchical cluster instance. Figure 6.a shows the total transactions for the three-instance cluster results. Figure 6.b shows the four-instance cluster results. Since the K-means and density clustering show better accuracy, the total transaction values difference becomes higher for each cluster instance. The EM clustering workload models have less differentiated disc I/O usage patterns. The hierarchical cluster workload model results show disc I/O usage difference decreases as the cluster instance number increases. This result shows that prior hierarchical results are misleading due to the number of cluster members for each hierarchical cluster instance. The K-means and density clustering workload model results show a higher disc I/O usage variance between cluster instances as the accuracy of the cluster increases. The EM clustering workload results show very similar disc I/O usages between cluster instances. Figure 6.c shows the total transactions for the five-instance cluster results. The results

for total disc I/O transactions were related to the results seen for CPU and memory usages. The total transactions differed in relation to an increase in the accuracy of the cluster results value. When analyzing these performance outputs, the hierarchical clustering results seemed to constitute an exceptional case. The hierarchical clustering results showed a high level of differentiation between the total disc I/O transactions for the workload performance tests, despite low accuracy rates. This outcome can be interpreted in terms of a disadvantage of the hierarchical clustering method. In the hierarchical clustering method, previous steps cannot be undone, so once a network element has been assigned to a cluster member, it cannot be re-assigned. The degree/level of difference between the cluster members affects the total disc I/O transaction counts. These performance results show that, although there is a correlation between accuracy and performance, exceptional cases must be considered based on the performance metric.

## CONCLUSION

In this study, we have described a workload characterization-based approach on telecom data for performance testing. To automate the process and create a simulation environment, a new workload-based simulation tool is implemented. Network element data is collected and downloaded over a selected period. The tool's workload characterization is done on this data based on clustering algorithms including K-means, EM clustering, hierarchical and density-based algorithm. Depending on the accuracy results, the best workload model is defined for the PAS software and then trace-based network element simulators are configured.

As shown in the case study, there is a high correlation between the performance characteristics and the accuracy of the cluster results. This outcome also shows accuracy of the workload models' importance for predicting the performance of the system. The performance tests are also conducted on measured CPU usage, memory usage and total disc I/O transactions. The PAS software performance and resource consumption tests are reviewed, and results were obtained for the defined workload. Our performance results show that since the defined workload model-based simulation environment mimics the production behavior, the results can be used to predict the performance of the PAS software. As a future work, we plan to extend this study for other performance metrics such as network throughput, database-related metrics, etc. Additionally, the correlation of these performance characteristics may also be required to analyze with the accuracy of the cluster results. To the best of our knowledge, workload characterization methodologies have not yet been studied for software operating within the telecom domain.

## REFERENCES

- Almeida, V., Fonseca R., Menasce, D.A., Mendes M.A., 1999. A Methodology for Workload Characterization of E-commerce Sites. In ACM Conference on Electronic Commerce.
- Amrehn, E., Busch A., Kounev S., Koziolk A., Noorshams Q., Reussner R., Jan. 2015. Automated workload characterization for i/o performance analysis in virtualized environments. In Proc. of the 6th ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering, pp. 265-276.
- Avritzer, A., Kondek J., D. Liu., July 2002. Software performance testing based on workload characterization. Proceedings of the 3rd international workshop on Software and performance.
- Calzarossa M.C., Luisa M., Tessera D. 2016. Workload Characterization: A Survey Revisited. ACM Computing Surveys, Vol. 48, No. 3, Article 48.
- Casalicchio E., Iannucci S., Silvestri L., Mar. 2015. Cloud desktop workload: A characterization study. In IEEE International Conference on Cloud Engineering (IC2E). IEEE, pp. 66-75.
- Celik, I., Gunaydin M., Resber C., Sonmez O., Tasdemir B., Unlu O.F. 2015. Network Element Simulation Based On Log Files. ICCIT Conference.
- Curiel, M., Pont A., January 2018. Workload Generators for Web-Based Systems: Characteristics, Current Status and Challenges. In IEEE Communication Surveys & Tutorials.



- Daniel, V., Mahmoud A., November 3-5 2015. Automated Workload Characterization Using System Log Analysis. In Computer Measurement Group Conf., San Antonio.
- Feitelson, D. G., Rudolph L., May 1996. Evaluation of design choices for gang scheduling using distributed hierarchical control. *J. Parallel & Distributed Comput.* 35(1), pp. 18-34, DOI:10.1006/jpdc.1996.0064.
- Feitelson, D. G., 21 Oct 2014. *Workload Modeling for Computer Systems Performance Evaluation*. Cambridge University Press.
- Feitelson, D. G., Zakay N., 2014. Workload resampling for performance evaluation of parallel job schedulers. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Vol. 26, No. 12, pp. 2079-2105.
- Franks, G., Woodside M., Petriu D.C., 2007. *Future software performance engineering*. Washington: IEEE Computer Society, pp. 171-187.
- Goren, H., Gorgun O., Yigit M., February 2017. IMS Automated Audit and Configuration: Parameters Audit SmartApp (PAS). *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, Vol. 5, No. 1.
- Gruttner, K., Hartmann P. A., Ittershagen P., Nebel W., 2015. A Workload Extraction Framework for Software Performance Model Generation. *RAPIDO '15 Proceedings of the 2015 Workshop on Rapid Simulation and Performance Evaluation: Methods and Tools*, Article No. 3.
- Hasselbring, W., Rohr M., Van Hoorn A., 2008. Generating probabilistic and intensity-varying workload for Web-based software systems. In *Proc. SIPEW '08*, pp. 124-143.
- Hasselbring, W., Krcmar H., Schulz E., Van Hoorn A., Vogele C., 2014. Automatic extraction of probabilistic workload specifications for load testing session-based application systems. In *Proc. Valuetools*.
- Helm, B. R., Malony A. D., September 2001. A theory and architecture for automating performance diagnosis. *Future Generation Computer Systems - I. High Performance Numerical Methods and Applications. II. Performance Data Mining: Automated Diagnosis, Adaption, and Optimization archive*, Volume 18, Issue 1, pp. 189-200.
- Jain, R., 2008. *The art of computer systems performance analysis*. John Wiley & Sons.
- Java Swing Framework - [https://en.wikipedia.org/wiki/Swing\\_\(Java\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Swing_(Java))
- Menasce, D. A., Pentakalos O. I., Yesha Y., 1996. Automated Clustering-Based Workload Characterization. In *Proceedings of the 5th NASA Goddard Mass Storage Systems and Technologies Conference*.
- Nakaike, T., Ohara M., Ueda T., Sept. 2016. Workload Characterization for Microservices. In *IEEE Workload Characterization (IISWC)*, pp. 25-27.
- Neuts, M. F., 17 July 1989. *Structured stochastic matrices of M/G/1 type and their applications*. CRC Press.
- Politi, R., Ruffo G., Schifanella R., Sereno M., 2004. WALTy (Web application load-based testing tool): A User Behavior Tailored Tool for Evaluating Web Application Performance. In: *Proceedings of the third IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA04)*.
- Saraswathi, S., Sheela M. I., November 2014. A Comparative Study of Various Clustering Algorithms in DataMining. *IJCSCMC*, Vol. 3 Issue 11, pp.422-428.
- Shirasb, S., 1983. *Workload Modeling and Characterization in Computer Systems Performance Evaluation*. North Dakota State University Press.
- Tietjen, G.L., 1986. The analysis and detection of outliers. In *Goodness-of-Fit Techniques*, R. B. D'Agostino and M. A. Stephens (eds.), pp. 497-522, Marcel Dekker, Inc.
- WEKA Java API - <http://weka.sourceforge.net/doc/stablen>
- Xu D., Tian Y., June 2015. A Comprehensive Survey of Clustering Algorithms. Volume 2 Issue 2 pp 165-193.



## GENİŞ BAŞLIKLİ SAVAKLARDAKİ SAVAK YÜKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK MODELLENMESİ

<sup>1</sup>Murat Can YILDIZ, <sup>2</sup>Alpaslan YARAR

<sup>1</sup>Devlet Su İşleri, 20. Bölge Müdürlüğü, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

<sup>1</sup>[muraticanyildiz91@gmail.com](mailto:muraticanyildiz91@gmail.com), <sup>2</sup>[ayarar@ktun.edu.tr](mailto:ayarar@ktun.edu.tr)

(Geliş/Received: 18.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 31.07.2019)

**ÖZ:** Açık kanallarda akışın kontrol edilebilmesi ve ölçülebilmesi maksadıyla kanalın enkesiti bir engel yerleştirilerek kapatılır. Bu amaçla inşa edilen hidrolik yapılardan birisi de savaklardır. Akış, savak yapısı üzerinden mansaba geçer. Savaklar keskin kenarlı, geniş tepeli ve ogee savakları olarak sınıflandırılabilir. Geniş başlıklı savakların memba kısmındaki akım şartlarına bağlı olarak kret genişliği tasarlanmakta olup kret boyunca kritik akımın oluşması sağlanır. Bu çalışmada farklı şev açlarına sahip geniş başlıklı savak modellerinin akım üzerindeki etkileri deney ortamında incelenmiştir. Üç farklı geniş başlıklı savak modeli oluşturulmuş ve her bir modelde 41 farklı debi için savak yükü okuması yapılmıştır. Yapılan deneylerle aynı şartları sağlayan sayısal modeller, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı olan ANSYS-FLUENT ile çözülmüştür. Deneysel ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Geniş başlıklı savak, açık kanal akışı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, ANSYS- FLUENT

### Experimental and Numerical Modeling of Head Over Broad Crested Weirs

**ABSTRACT:** The cross section of an open channel is closed by a barrier, in order to measure and control to the flow. Weirs are one of the hydraulic structures, constructed fort his aim. Flow pass over the weir to the downstream. Weirs can be classified as sharped crested weirs, broad crested weirs and ogee spillways. Crest width of the broad crested weir is designed according to flow conditions on upstream, so, critical flow can be obtained throughout the crest. In this study, the effect of the broad crested weirs models, having different slopes, on the flow conditions, by experimental. Three different broad crested weirs were made and 41 head were measured for different discharge on each model. Numerical models, having the same conditions with the experimental models, were also done by ANSYS-FLUENT, computational fluid dynamics (CFD) software. Results of the experimental and numerical models were compared and it was seen that the results are consistent with each other.

**Keywords:** Broad crested weir, open channel flow, computational fluid dynamics, ANSYS-FLUENT

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Açık kanal akımlarında akışın kontrol altına alınabilmesi, debinin ölçülebilmesi ve kanal enkesitinden geçen akışkanın derinliğinin ayarlanabilmesi maksadıyla akışkanı üzerinden akıtarak mansaba geçiren ve savak adı verilen engeller inşa edilir. Uygulamada kullanılan birçok savak tipi

mevcuttur. Bunlar keskin kenarlı savak, geniş başlıklı savak ve ogee savağı olarak sınıflandırılabilir. Geniş başlıklı savaklar, kret genişliği boyunca kritik akış şartını sağlamaya yararlar. Bu itibarla geniş başlıklı savakların tasarımında kanala gelecek suyun debisinin hangi aralıklarda olduğu bilinmeli ve göz önüne alınmalıdır (Çengel ve Cimbala, 2015).

Tüm su yapılarında olduğu gibi geniş başlıklı savakların bulunduğu akım sistemlerinde de sağlıklı bir tasarım yapabilmek için su ile yapı arasındaki etkileşim doğru analiz edilmelidir. Bu analizler deneysel ve sayısal modelleme olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Deneysel çalışmalar esnasında tasarlanmak istenen su yapısı fiziksel olarak laboratuvar ortamında modellenmekte, yapı ile etkileşim halinde olan akımın analizi yapılabilmektedir. Teknolojik gelişmelerin getirdiği imkânlar dâhilinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tabanlı paket yazılım programları sayesinde akım analizleri sayısal olarak bilgisayar ortamında modellenerek deneysel çalışmalara kıyasla çok daha hızlı ve ekonomik olarak çözülebilmektedir. Deneysel çalışmalar esnasında insan ve ölçek kaynaklı hataların elde edilen sonuçları etkilemesi tasarımcıların HAD yazılımlarını tercih etmesine neden olan önemli etkenlerden birisidir.

Geniş başlıklı savak akımları üzerine birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Hager ve Chwalt (1994), geniş başlıklı savak üzerindeki akımı farklı debiler kullanarak deneysel olarak incelemişlerdir. Savak üzerindeki akım ve basınç dağılımlarının benzer özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir. Chanson ve Montes (1998), laboratuvar ortamında modelledikleri dairesel savak üzerinden geçen akım ile ilgili deneysel çalışmalar yapmıştır. Savak yarıçapı ve yüksekliği gibi modele ait ebatlar ile memba su derinliğinin, akım karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sarker ve Rhodes (2004), dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savak üzerindeki açık kanal akımını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. HAD tabanlı Fluent programıyla akımı idare eden temel denklemleri sayısal olarak çözmüştür. Çalışmalardan elde edilen bulgular kıyaslanmış olup birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Kırkgöz ve diğ. (2006), üçgen ve dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savaklar ile etkileşim halindeki serbest yüzeyli iki boyutlu akım üzerinde PIV tekniği ile ölçümler olarak deneysel çalışmalar yapmıştır. Akımı idare eden denklemleri, standart  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modellerini kullanarak sonlu elemanlar yöntemine dayalı ANSYS-Flotran ile çözmüşlerdir. Öner ve diğ. (2007), dikdörtgen kesitli geniş başlıklı savakla etkileşim halindeki serbest yüzeyli akımın hız alanını PIV tekniği ile ölçerek deneysel olarak irdelemişlerdir. Bal (2011), geniş başlıklı dikdörtgen bir savak modeli üzerinde LDA tekniği ile farklı iki debi durumunu deneysel olarak incelemiştir. ANSYS-Fluent programı yardımıyla geniş başlıklı savak akımını idare eden denklemleri, SKE, RNG, RKE, MKW, SST ve RSM türbülans modellerini kullanarak çözmüştür. Su yüzü profilini akışkan hacimleri (VOF) yöntemini kullanarak teorik olarak hesaplamıştır. Çalışmış olduğu her iki debi durumu için kullandığı altı türbülans modellerinin başarı sıralamasını yapmıştır. Felder ve Chanson (2012), açık kanal içerisine yerleştirilen geniş başlıklı savak üzerinde deneysel çalışmalar yaparak su yüzü profilleri, hız ve basınç dağılımlarını ölçmüşlerdir. Elde edilen bulguların pürüzsüz türbülans sınır tabaka teorisinden farklı olmasına rağmen sonuçların önceki çalışmalarla tutarlı olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada farklı şev eğimlerine sahip geniş başlıklı savaklar, laboratuvar ortamında fiziksel olarak modellenerek savak yükleri ölçülmüştür. Aynı savaklar ayrıca ANSYS- Fluent programında da sayısal olarak modellenmiş ve ölçümler alınmıştır. Fiziksel model ile sayısal modelin sonuçları karşılaştırılarak sonuçların tutarlılığı incelenmiştir. Ayrıca savaklardaki şev eğiminin savak yükleri üzerine etkisi de araştırılmıştır.

## **MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)**

Çalışma kapsamındaki deneyler Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Hidrolik Laboratuvarında mevcut bulunan  $L=6\text{m}$ ,  $b=0,3\text{ m}$ ,  $y=0,5\text{ m}$  boyutlarındaki açık kanal düzeneğinde yapılmıştır. Şekil 1.'de gösterilen kanalın taban ve yan yüzeyleri cam malzemeden teşkil edilmiştir. Kanalın memba ve mansabında bulunan haznelere çelik boru ile birbirine bağlanmış olup çelik boru üzerindeki iki adet pompa yardımıyla kanaldan akan suyun devir-daimi sağlanmaktadır. Çelik boru üzerindeki iki adet pompanın kumanda paneli yardımıyla frekansları ayarlanabilmekte ve bu

sayede farklı debi akışları sağlanmaktadır. Ultrasonik debimetre yardımıyla debi okunması yapılmaktadır.



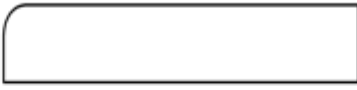
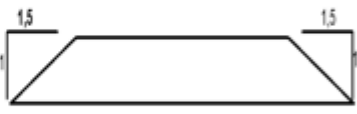
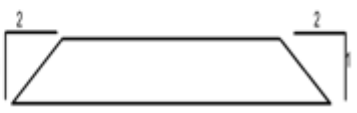
Şekil 1. Açık kanal deney düzeneği genel görünümü

Figure 1. General overview of open channel

Çalışma kapsamındaki deneylerde üç farklı geniş başlıklı savak modeli üzerinde çalışılmıştır (Çizelge 1.). İlk ölçümler, Romijin (1932) tarafından tasarlanan model üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan geniş başlıklı savak modellerinin özellikleri

Table 1. Properties of broad crested weir models used in experiments

| Model No | Kret Yüksekliği | Kret Genişliği | Şekil  |
|----------|-----------------|----------------|--|
| 1        | 10 cm           | 65 cm          |  |
| 2        | 10 cm           | 65 cm          |  |
| 3        | 10 cm           | 65 cm          |  |

Fiziksel modeller pleksiglas malzemeden levhalar kullanılarak oluşturulmuştur. Pleksiglas hafif, işlenmesi kolay ve sağlam yapılı bir plastik camdır. Renkli ve renksiz çeşitleri bulunmaktadır. Kesilmeye müsait yapısı sayesinde istenilen model ebatları rahatlıkla elde edilebilmektedir.



Şekil 2. Deneylerde kullanılan iki farklı geniş başlıklı savak modeli

Figure 2. Two different broad crested weir models used in experiments

Deneysel her bir modelde 41 farklı debi kullanılmıştır. Her debi için limnometreler yardımıyla memba savak yükü okuması yapılmıştır.

## TEMEL DENKLEMLER VE SAYISAL MODELLEME (BASIC EQUATIONS AND NUMERICAL MODELING)

### Temel Denklemler (Basic Equations)

Çalışma kapsamında üzerinde çalışılan geniş başlıklı savaklar açık kanal akımı ile etkileşim halindedir. İncelenen bu akım türbülanslı, iki boyutlu, sıkışmayan, düzenli akımlardır.

### Süreklilik denklemi (Continuity equation)

Kütlenin korunumu prensibinin akış akımlarında uygulanması ile türetilir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$u_i$  terimi  $x_i$  doğrultusundaki hız bileşenini temsil eder.

### Hareket denklemi (Motion equation)

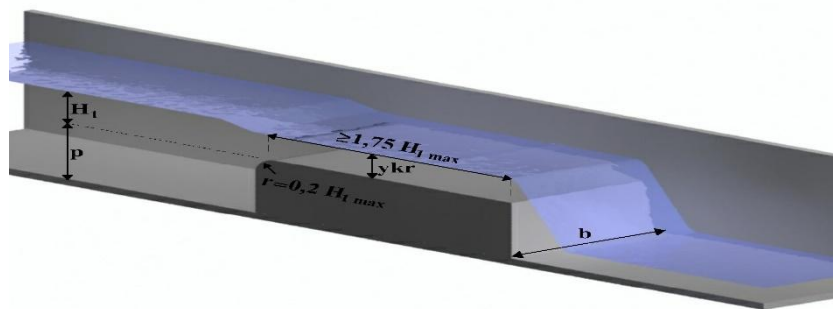
Belirli bir kontrol hacimden geçen akıma momentumun korunumu prensibinin uygulanması ile hareket denklemleri elde edilir. Türbülanslı akımlarda Navier- Stokes denklemlerinden türetilen Reynolds denklemleri akımı idare eden hareket denklemleridir.

$$\rho \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right) = \rho X - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} (-\rho \overline{u'^2}) + \frac{\partial}{\partial y} (-\rho \overline{u'v'}) + \frac{\partial}{\partial z} (-\rho \overline{u'w'}) \quad (2)$$

### Enerji denklemi (Energy equation)

Gerçek akışkanlar için en genel hali ile enerji denklemi:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \Delta H \quad (3)$$



Şekil 3. Yuvarlanmış burunlu geniş başlıklı savak

Figure 3. Broad crested weir with a rounded nose

(3) no.lu denklem sürtünmenin ihmal edildiği Şekil 3.'de gösterilen geniş başlıklı savak için uygulandığında kritik yükseklik ve savak yükü arasındaki bağıntı:

$$y_{kr} = \frac{2}{3} \left( H + \frac{v_{kr}^2}{2g} \right) \quad (4)$$

elde edilir.

### HAD İle Sayısal Model Oluşturulması (Creating a Numerical Model with CFD)

Deneysel çalışmalarda kullanılan fiziksel modeller ANSYS-FLUENT paket programı aracılığıyla sayısal olarak modellenmiş ve çözülmüştür.

#### Sonlu Hacimler Yöntemi (Finite Volumes Method)

Sonlu hacimler yöntemi, korunum prensiplerinden hareketle türetilen kısmi diferansiyel denklemleri sonlu hacimler üzerindeki ayrık cebirsel denklemlere dönüştürerek çözmeyi sağlar. Çözüm bölgesi sonlu hacimlere bölünerek ayrıklaştırılır. Her bir sonlu hacim üzerine kısmi diferansiyel denklemler entegre edilerek cebirsel denklemlere dönüştürülür. Daha sonra elde edilen cebirsel denklemler, sonlu hacimlere ait bağımlı değişken değerlerini hesaplamak amacıyla çözülür (Moukalled ve diğ., 2016).

Kontrol hacim dengesini gösteren denklemler:

$$\int_{KH} \text{div } \underline{a} dV = \int_A \underline{n} \underline{a} dA \quad (5)$$

$$\int_A \underline{n} (\rho \Phi \underline{u}) dA = \int_A \underline{n} (\Gamma \text{grad} \Phi) dA + \int_{KH} S_\Phi dV \quad (6)$$

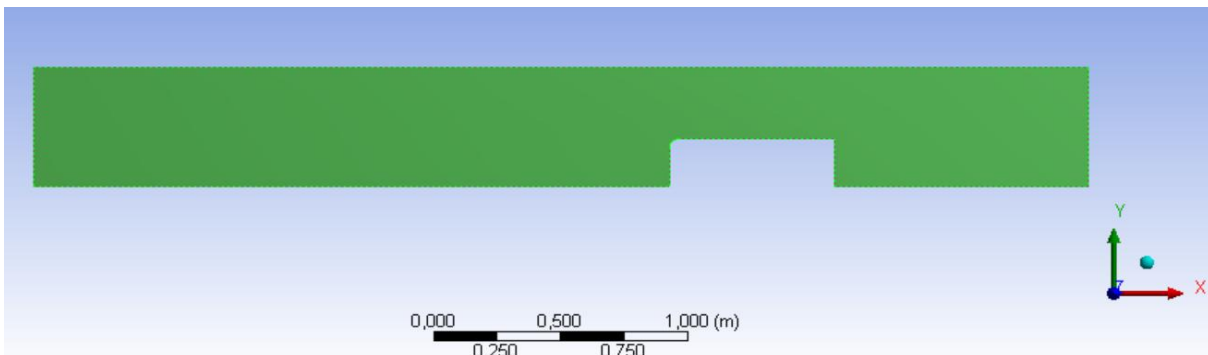
şeklinde olup (4) no.lu denklemin sol kısmı net konveksiyona bağlı akımı, sağ kısmı net difüzyon akışı ve kontrol hacimdeki  $\Phi$  özelliğinin değişimini gösterir (Filinte, 2006).

#### Akışkan Hacmi Yöntemi (Fluid Volume Method)

Su ve hava gibi birbirine karışmayan akışkanlar arasındaki ara kesit yüzeyin şekli ve oluşumu, sabit bir Eulerian ağına uygulanabilen akışkan hacmi yöntemi kullanılarak incelenebilir (Hirt ve Nichols, 1981). Bu yöntem sayesinde çözüm bölgesinde su ve havayla dolu olan kısımlar belirlenir. Modelleme çalışması esnasında oluşturulan çözüm bölgesinde hacimsel doluluk oranını gösteren akışkan hacmi tanımlanır. Çözüm bölgesi içerisindeki hesaplama ağındaki eleman tam dolu ise  $F=1$ , boş yani hava ile doluyken  $F=0$  değerini almaktadır.

#### Hesaplama Bölgesi, Çözüm Ağları ve Sınır Şartları (Solution Area, Meshing and Boundary Conditions)

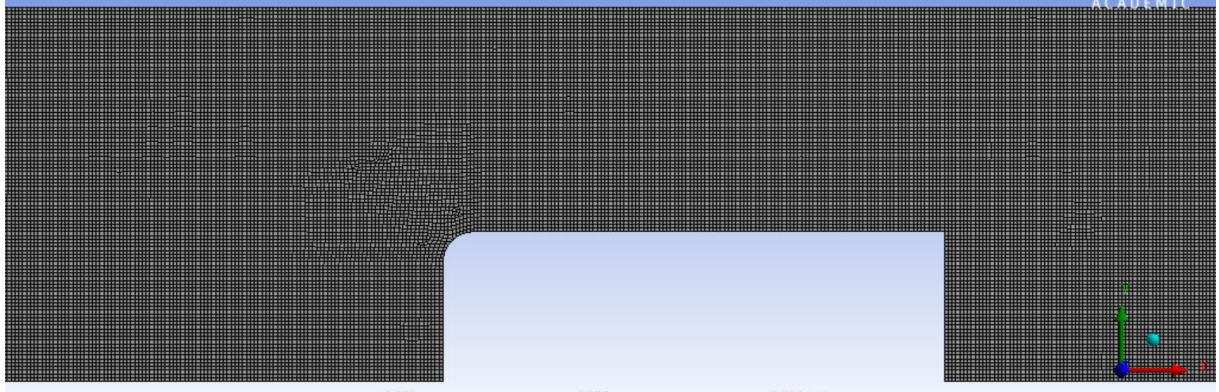
Hesaplama bölgesi yani model geometrisi oluşturulurken Ansys- Fluent programına entegre olarak kullanılabilen programlardan faydalanılabilmektedir. Sayısal çalışma kapsamında 2 boyutlu modeller, Autocad programı ile oluşturularak Ansys- Fluent'e aktarılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. İki boyutlu olarak belirlenen hesaplama bölgesi

Figure 4. Solution area determined in two dimensions

Aktarılan model geometrisi üzerinde mesh ızgaraları oluşturulmuştur. Mesh ebat ve şekilleri belirlenirken deneme yanılma yoluna gidilmiştir. Elde edilen tecrübeler neticesinde 5 mm boyutlarında üçgen ağlar ile çalışılmasının uygun olduğu görülmüştür (şekil 5). İki boyutlu model de sınır şartları tanımlanırken programın çalışma mantığına uygun olarak giriş kısmı inlet, çıkış kısmı outler, üst sınır ve kanal tabanı wall , çözümlenilecek alan akış bölgesi interior olarak belirlenmiştir.



şekil 5. Sayısal model mesh görünümü

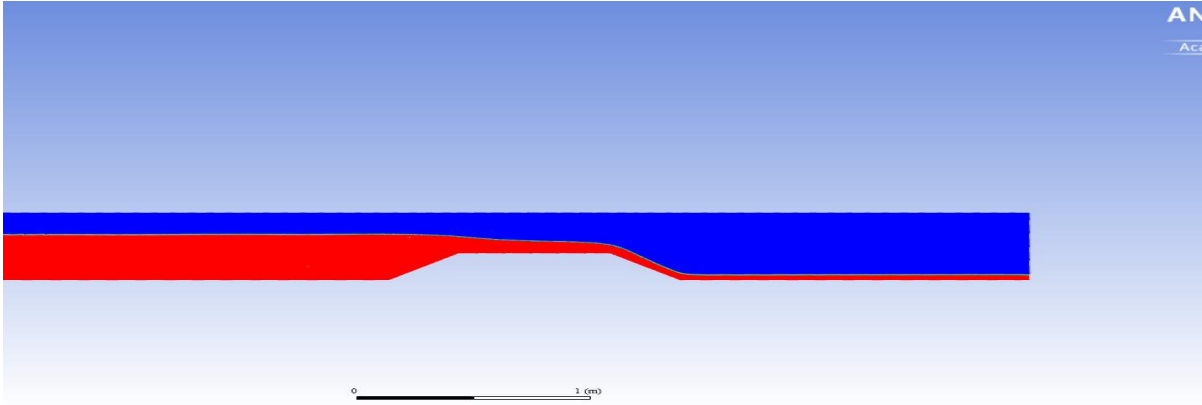
*Figure 5. Mesh view of numerical model*

#### **Modelin Çözülmesi ve Sonuçların Alınması (Solving the Model and Getting Results)**

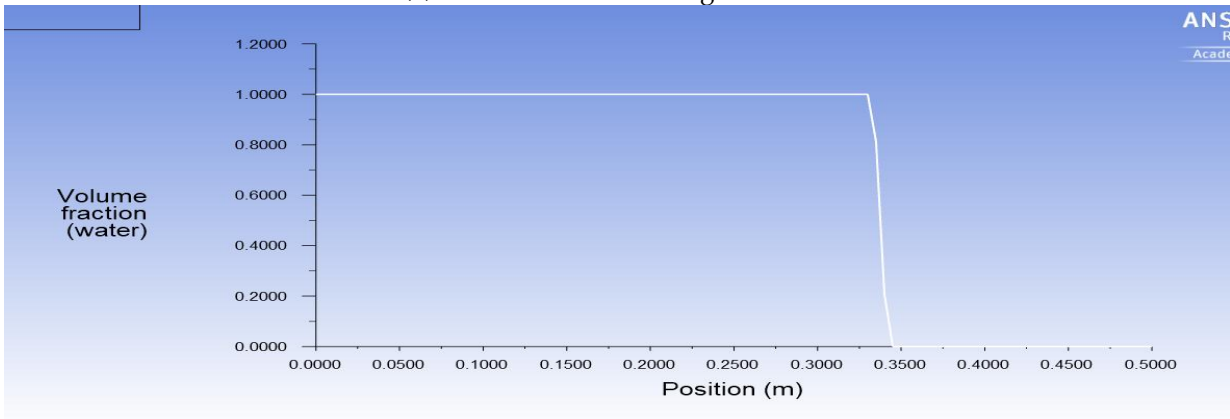
Model geometrisi üzerinde mesh ızgaraları oluşturulup sınırlar belirlendikten sonra Fluent'in çözümlenilecek bölüme geçilir. Bu aşamada ilk olarak yer çekimi ivmesi, yüzey gerilimi ve açık hava basıncı gibi çözüme etki eden fiziksel parametreler girilir. Modelin çözümünde yukarıda bahsedildiği üzere kullanılan Volume of Fluid yöntemi tanımlanır. Daha sonra fazlar belirlenir ve çözümlenilecek bölgedeki kütle akış değeri girilir. Sayısal model çözümlerinden türbülans k-  $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır.

Model çözümünün son aşaması iterasyon sayısının ve zaman adımının girilmesidir. Deneme yanılma yöntemi sonucunda, sağlıklı sonuçlara  $\Delta t = 0.003$  sn. zaman adımında 8000 iterasyon sayısı ile çözümlenilebildiği görülmüştür.

Hesaplamanın tamamlanması sonrasında hava ve su fazlarının görünümü üzerinde su yüksekliği okuması yapılacak yerlerin tespiti yapılır ve grafik şeklinde sonuçlar elde edilir (şekil 6).



(a) Hava ve su fazlarının görünümü



(b) Su yüksekliğini gösteren grafik

Şekil 6. Ansys-Fluent'den sonuçların alınması

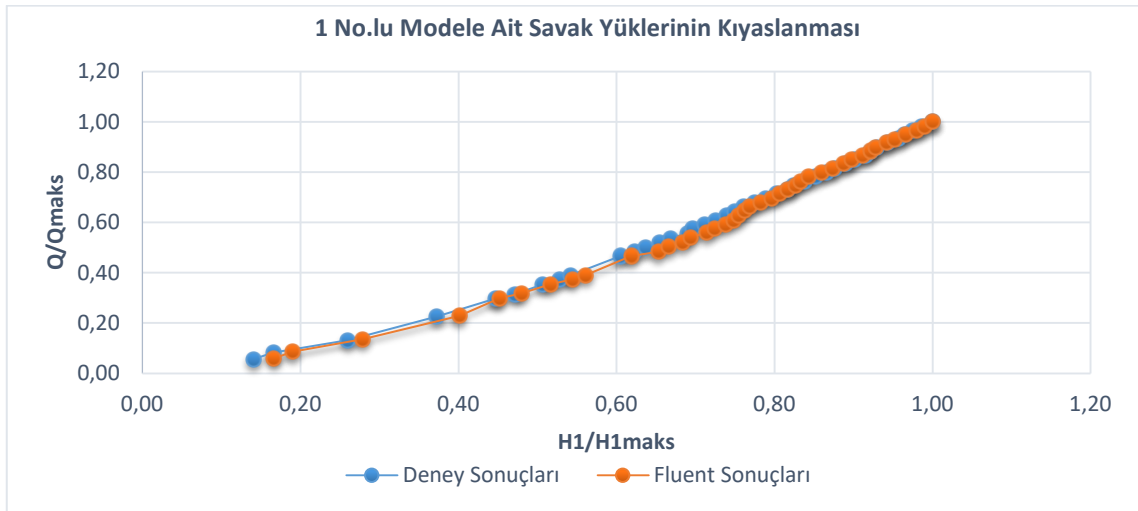
Figure 6. Getting results from Ansys-Fluent

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA (RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION)

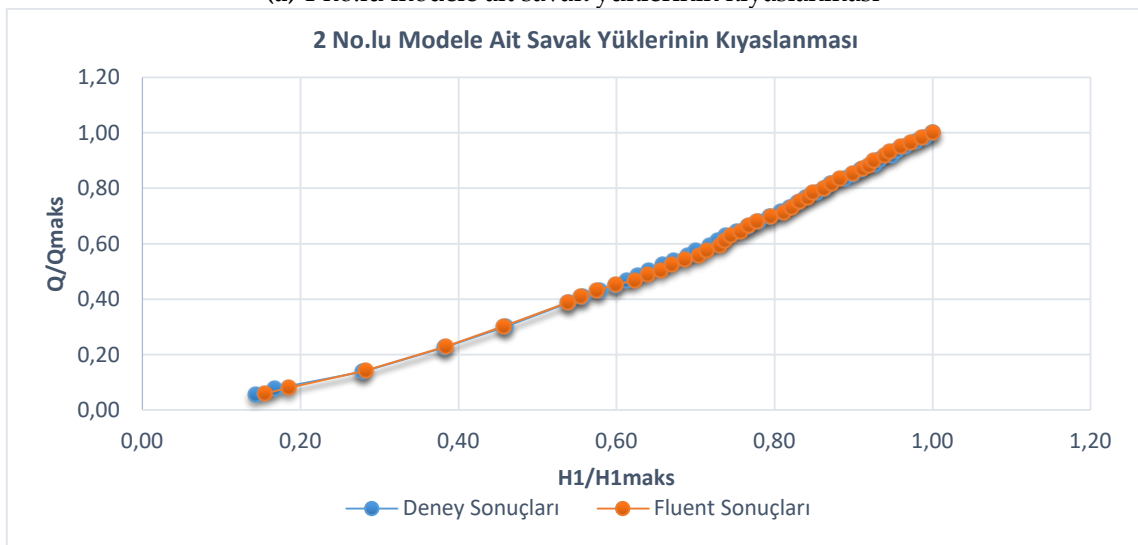
### Deneysel ve Sayısal Savak Yüklerinin Kıyaslanması (Comparison of Experimental and Numerical Total Heads)

Çalışma kapsamında 41 farklı debi için hem deneysel hem sayısal modeller üzerinde savak yükü okuması yapılmıştır. Deneysel ve sayısal modellerden elde edilen sonuçlar  $Q/Q_{maks}$ -  $H_1/H_{1maks}$  grafikleri çizdirilerek sonuçlar kıyaslanmıştır. Grafikler incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Üç farklı geniş başlıklı savak modelinde yapılan karşılaştırmalar Şekil 7'de verilen grafiklerde gösterilmiştir.

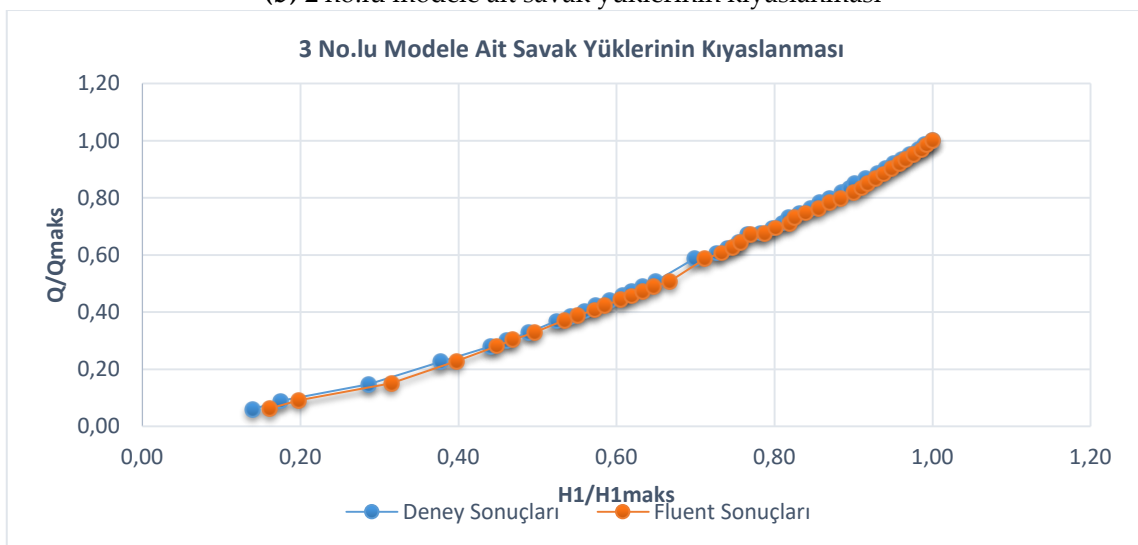




(a) 1 no.lu modele ait savak y¼klerinin kıyaslanması



(b) 2 no.lu modele ait savak y¼klerinin kıyaslanması

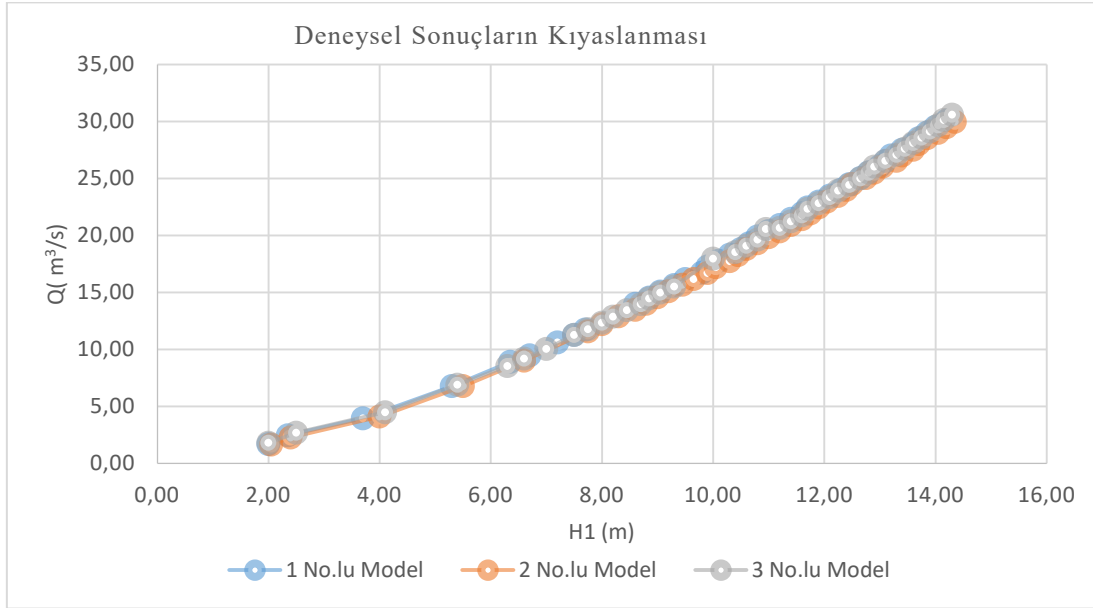


(c) 3 no.lu modele ait savak y¼klerinin kıyaslanması

**şekil 7. Sonuçların kıyaslanması***Figure 7. Comparison of the results*

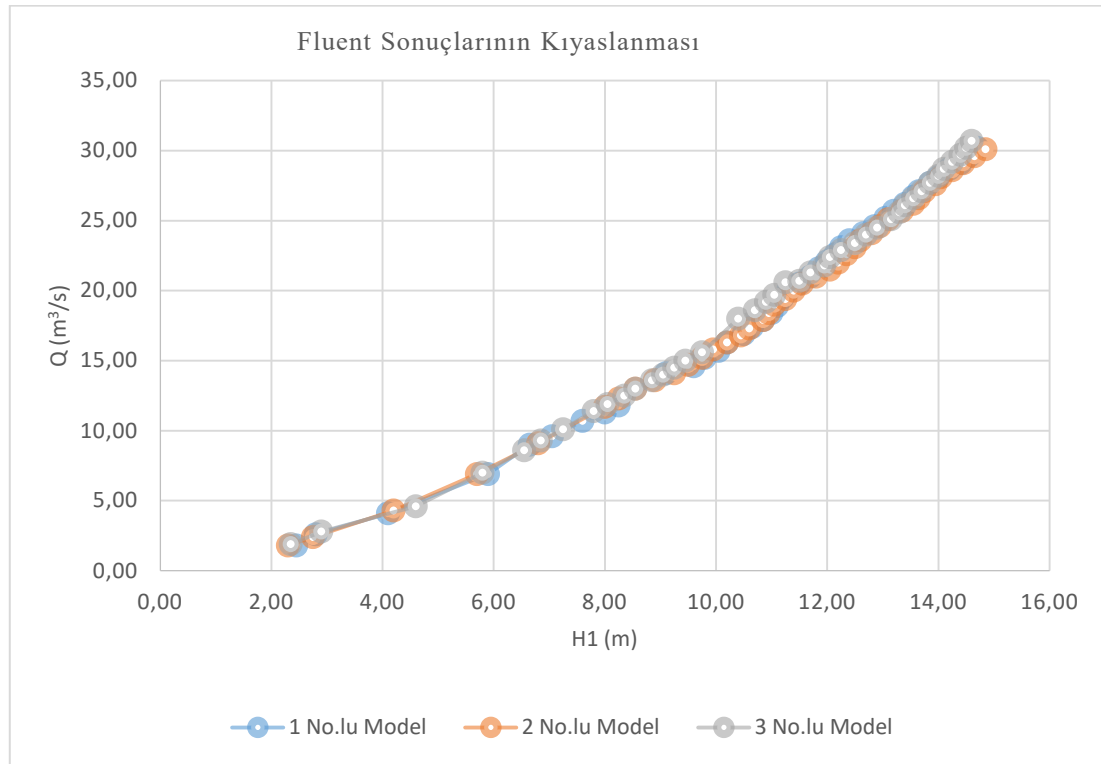
### Farklı Şev Eğimlerine Sahip Modellerin Deneysel ve Sayısal Savak Yükleri (Experimental and Numerical Total Heads of Models with Different Slopes)

Çalışma kapsamındaki bir diğer araştırma konusu modelde şev olmasının ya da farklı eğimli şevlerin savak yükleri üzerinde etkisi olup olmadığıdır. Bu nedenle üç modelden elde edilen deneysel ve sayısal bulgular Q-H<sub>1</sub> grafiği çizdirilerek kıyaslanmış olup neticede sonuçlara ciddi bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. 1, 2, 3 no.lu modellere ait savak yüklerinin kıyaslandığı Q- H<sub>1</sub> grafikleri Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. 1, 2, 3 no.lu modellerde yapılan deneylerden elde edilen savak yükü değerlerinin kıyaslanması

Figure 8. Comparison of total head values obtained from experiments performed on models 1, 2, 3



Şekil 9. 1, 2, 3 no.lu modellere ait Fluent sonuçlarının kıyaslanması

Figure 9. Comparison of Fluent results for models 1, 2, 3

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı şev eğimine sahip geniş başlık savak modelleri üzerinde 41 farklı debi durumu için deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Üç farklı model fiziksel ve sayısal olarak oluşturulmuştur. Fiziksel modellerde, savak yükü okumaları limnometre yardımıyla yapılmıştır. Nümerik çalışmalarda akışı temsil eden temel denklemler HAD tabanlı Ansys-Fluent programı kullanılarak çözülmüştür. Sayısal modelin su yüzü profili akışkan hacmi yöntemi (VOF) ile hesaplanmıştır. Türbülans modeli olarak  $k-\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. Mesh sayısı ve şekli ile çözüm için uygulanacak iterasyon sayısı deneme yanılma yolu ile elde edilen tecrübeler neticesinde belirlenmiştir. Deneysel ve Ansys-Fluent sonuçları grafiksel olarak kıyaslanmış, birbirine uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Sonuçlar arasındaki uyumun yüksek debilerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Modellere şev eklenmesinin veya farklı şev eğimlerinin savak yüklerine olan etkisi araştırılmış olup sonuçlara kayda değer bir etkisi olmadığı kanaatine varılmıştır.

**Bilgi:** Bu çalışma Murat Can YILDIZ'ın " Farklı Şev Eğimlerine Sahip Geniş Başlıklı Savakların Deneysel ve Sayısal Olarak Modellenmesi" isimli Yüksek Lisans Tez çalışmasından yararlanılarak yapılmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bal, H., Geniş Başlıklı Savak İçeren Açık Kanal Akımının Sayısal Modellenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2011.
- Chanson, H., Montes, J. S., 1998. Overflow characteristics of circular crested weirs: Effects of inflow conditions. J. Irrig. Drain Eng. 124(3), 152 –162.

- Çengel, Y.A., Cimbala, J.M., 2015, Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları, Palme Yayıncılık, Ankara, 766-767.
- Felder, S, Chanson, H. "Free-surface Profiles, Velocity and Pressure Distributions on a Broad-Crested Weir: a Physical study", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 138, 1068–1074, 2012.
- Filinte, E.G., Konveksiyon-Difüzyon Problemlerinin Sonlu Hacim Yöntemi ile Analizi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, Türkiye, 2006.
- Hager, M.W.H., Chwalt, M., "Broad Crested Weir", Journal of Irrigation and Drainage Engineering ,43-85, 1994.
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., Volume of Fluid Method for The Dynamics of Free Boundaries, Journal Of Computational Physics 39:201-225, 1981.
- Kırkgöz, M. S., Öner, A. A., Yatay Bir Dairesel Silindir Etrafındaki Akımda Hız Alanının Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Ç.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21:85-98, 2006.
- Moukalled, F., Magani, L., Darwish. M., 2016, The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics, Springer International Publishing, Switzerland, 4-5.
- Öner, A.A., Kırkgöz, M.S., Aköz, M.S., "Geniş Başlıklı Savak Akımının Deneysel ve Sayısal Yöntemle İncelenmesi", III. Ulusal Su Mühendisliği Sempozyumu, 3-12, İzmir, Türkiye, 2007.
- Romijin, D. G. Een regelbare mmetoverlaat als tertiaire aftapsluis. (A movable mesuring weir turnout structure.) De waterstaatsingenieur, nr. 9, 1932.
- Sarker, M. A., Rhodes, D. G., 2004. Calculation of free-surface profile over a rectangular broad-crested weir, Flow measurement and Instrumentation 15 ,215–219.
- Yıldız, M. C., 2019. Farklı Şev Eğimlerine Sahip Geniş Başlıklı Savakların Deneysel ve Sayısal Olarak Modellenmesi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.



## LQR KONTROLCÜ PARAMETRELERİNİN SİSTEM DAVRANIŞINA ETKİ ANALİZİ: ÇİFT ÇUBUKLU TERS SARKAÇ SİSTEMİ

<sup>1</sup>Tuğçe YAREN, <sup>2</sup>Selçuk KIZIR

*Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE*

<sup>1</sup>[tugce.yaren@kocaeli.edu.tr](mailto:tugce.yaren@kocaeli.edu.tr), <sup>2</sup>[selcuk.kizir@kocaeli.edu.tr](mailto:selcuk.kizir@kocaeli.edu.tr)

(Geliş/Received: 04.07.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.08.2019)

**ÖZ:** Bu çalışmada ters sarkaç sistem türlerinden biri olan doğrusal tahrikli çift çubuklu ters sarkaç sisteminin doğrusal karesel regülatör (LQR) yöntemine dayanan durum geri besleme yöntemi ile kontrolüne yönelik benzetim sonuçları sunulmuştur. Tek çubuklu ters sarkaç sistemine göre çift çubuklu ters sarkaç sisteminin kontrolü kararsızlık, eksik tahrik ve doğrusalsızlık özellikleri nedeniyle daha zor bir problemdir. Dolayısıyla sistemin denge kontrolünü sağlamaya yönelik tasarımı yapılan LQR kontrolcü parametrelerinin sistem davranışına etkileri ayrıntılı olarak ele alınarak kontrol algoritması tasarım süreci iyileştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal Tahrikli – Çok Çubuklu Ters Sarkaç Sistemleri, LQR, Optimal Durum Geri Beslemeli Kontrol

### Impact Analysis of LQR Controller Parameters on System Dynamic: Double Inverted Pendulum

**ABSTRACT:** In this study, simulation results for the control of the cart – pole double inverted pendulum system which is an type of inverted pendulum system by the state feedback method using linear quadratic regulator (LQR) are presented. The control problem of the double inverted pendulum is more difficult than the control problem of the single inverted pendulum because of instability, nonlinearity characteristics. Therefore, the control algorithm design process has been improved by considering the effects of LQR controller parameters designed to provide stability control of the system on system dynamic in detail.

**Key Words:** Linear Driven – Multi Pendulum Inverted Pendulum Systems, LQR, Optimal State Feedback Control

### GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kontrol sistemlerine ait çalışma ve uygulama alanları günümüzde her alanda karşımıza çıkmaktadır. İnsan müdahalesini en aza indirmek amacıyla geliştirilen otomasyon ve robotik sistemlerin endüstriyel alanlardaki uygulamalarının yaygınlaşması, endüstriyel sistem tasarımı imalat teknolojilerinin yanı sıra, kontrol teorisi ve kontrolcü geliştirilmesini de zorunlu kılmaktadır (Şen ve diğ., 2016). Bir sistemin işlevlerini yüksek doğruluk ve hassasiyette yerine getirebilmesinin temel koşullarından biri başarılı bir denetleyiciye sahip olmasıdır. Bu bağlamda, sistemlerin kontrolünde çeşitli yöntemlerin uygulandığı görülmektedir.

Kontrol yöntemleri, ilgili kontrol kuralı türetilirken sistem dinamiğinin kullanılıp kullanılmamasına bağlı olarak öncelikle model tabanlı ve model tabanlı olmayan kontrol yöntemleri olmak üzere iki grupta toplanabilir (Özkan, 2009). Sistem matematiksel modelinin elde edilmesi, kontrolör tasarımında istenen bir durumdur. Sistem dinamik davranışı çalışma koşullarının tamamında geçerli olacak şekilde tam olarak modellenemese ve parametreler için elde edilen veya kestirilen değerler bir miktar belirsizlik

içerse dahi, sistemin dinamik davranışını tanımlayan bir matematiksel model kullanılarak analitik yöntemlerle daha hassas kontrol sistemleri tasarlamak mümkündür. Kontrol sistemlerinde sıklıkla kullanılan model tabanlı kontrol yöntemlerinden biri de LQR (Linear Quadratic Regulator) kontrolüdür.

Kontrol algoritması geliştirme sürecinde kontrolcü parametrelerinin etkilerinin analizi oldukça önemlidir. Bu etkilerin bilinmesi, endüstriyel uygulamalardaki kararsız sistemler için kontrol teorilerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada LQR kontrolcü tasarımı ve kontrolcü parametrelerinin sistem davranışına etkilerinin analizi; robotik, uzay-havacılık sistemleri, deniz sistemleri, esnek sistemler, mobil sistemler vb. olmak üzere geniş bir uygulama alanına sahip olan ve birçok endüstriyel sistemin kontrol çalışmalarındaki teorik altyapısını oluşturan ters sarkaç sistemi için gerçekleştirilmiştir.

Ters sarkaç sistemleri, doğrusal olmayan, kararsız, eksik tahrikli yapılarından dolayı kontrol alanındaki çalışmalarda kullanılmaya oldukça uygundurlar. Kontrol teorisi üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarında ters sarkaç sistemleri iyi bir test düzeneği olduğundan, bu sistemler farklı kontrol yöntemlerinin tasarımında ve uygulanmasında sıklıkla tercih edilmektedir (Yaren, 2018). Gerek yeni tasarlanan kontrolcü performansının gözlemlenmesi, gerekse mevcut kontrolcü performanslarının iyileştirilmesine yönelik literatürde oldukça fazla çalışma bulunmaktadır (Şen ve diğ., 2016). Ayakta duran insanın modellenmesinde, insan kolunun modellenmesinde, itme kuvvetinin alttan uygulandığı roket, füze vb. sistemlerde ve benzer birçok sistemde ters sarkaç ve çift ters sarkaç modelinden faydalanılmaktadır (Bilgiç ve diğ., 2015; Mifsud ve diğ., 2016; Suzuki, 2012; Colobert, 2006; Nagasaki ve diğ., 2003). Ayrıca, uçuş sistemlerinin kalkış ve iniş problemlerinin üstesinden gelinmesinde, gemilerdeki denge probleminin çözümünde, hava türbülansına giren uçakların dengede kalmasının sağlanmasında, çeşitli kuvvet ölçüm cihazlarında ve benzer daha birçok endüstriyel alanda çift sarkaç sistemi ve eş sarkaçlar kullanılmaktadır (Poorhossein ve Vahidian, 2010; Kizir, 2008; Boubaker, 2012; Wanli ve diğ., 2014)). Ters sarkaç sistemlerinin füze, vinç, araba, uçak, robot kontrolü gibi birçok kontrol sisteminin temelini oluşturduğu açıkça görülmektedir.

Zhang ve Zhang (2012), düzlemsel çift ters sarkaç sisteminin dengelenmesi için kendinden ayarlı LQR kontrolör yöntemini uygulamışlardır. Hem simülasyon ortamında hem de deneysel olarak sonuçları incelemiş ve kontrolörün farklı çalışma koşullarında hızlı yanıt verdiği ve iyi bir kararlılık sağladığı sonucuna varmışlardır. Li (Li, 2013), döner çift ters sarkacın dengelenmesi üzerine bir tez çalışması gerçekleştirmiştir. Sisteme uygulanacak LQR kontrolörünü tasarlamış ve Lyapunov yöntemi ile kararlılık analizi yapmıştır. LQR kontrolörünün performansının artırılması amacıyla doğrudan uyarlamalı bulanık mantık yöntemini geliştirmiştir. Bu iki kontrol algoritmasının benzetim sonuçlarını vermiş ve ters sarkacın artan gürbüzlüğünden doğrudan uyarlamalı bulanık mantık yönteminin LQR performansını arttırabildiği sonucuna varmıştır. Block (Block, 1996), iki sarkacın sabit bir yere monte edildiği ve sadece birinci ekleme tahrik uygulandığı Pendubot sisteminin kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sarkaçların yükseltilmesinde kısmi geri beslemeli doğrusallaştırma yöntemini, dengelenmesinde ise LQR ve kutup yerleştirme yöntemlerini kullanmıştır. Bogdanov doğrusal arabalı çift ters sarkaç sisteminin optimal kontrolü için LQR, Bulanık Mantık, durumlara bağlı "Ricatti Eşitliği" ve kombinasyonlarından oluşan farklı kontrolcü yaklaşımları test etmiştir. Sonuçta, en iyi performansı LQR kontrol üzerinden durumlara bağlı Ricatti Eşitliği ile tasarladığı kontrolcüde elde etmiştir (Bogdanov, 2004).

Bu çalışmada, doğrusal tahrikli çift çubuklu ters sarkaç sisteminin denge kontrolünü sağlamaya yönelik tasarımı yapılan LQR kontrolcü parametrelerinin sistem davranışına etkileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, sistemin matematiksel modeli Lagrange yöntemine dayalı olarak elde edilmiş ve sistemin durum uzay modeli verilmiştir. Üçüncü bölümde, çift ters sarkaç sistemi için LQR tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dördüncü bölümde ise LQR kontrolcü parametrelerinin, sistem performansı üzerindeki etkisinin belirlenmesi için farklı konfigürasyonda parametrelerle kontrolcü güncellenmiştir. Ayrıca LQR kontrolcü parametrelerinin sistemin kontrolü üzerindeki etkinliklerini inceleyebilmek amacıyla, MATLAB/Simulink ortamında sistemin benzetim çalışmaları yapılmış, sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur. Sonuç olarak LQR kontrolcü parametrelerinin etkileri detaylı bir şekilde ele alınarak kontrol algoritması tasarım süreci iyileştirilmiş ve birçok endüstriyel sistemin kontrol

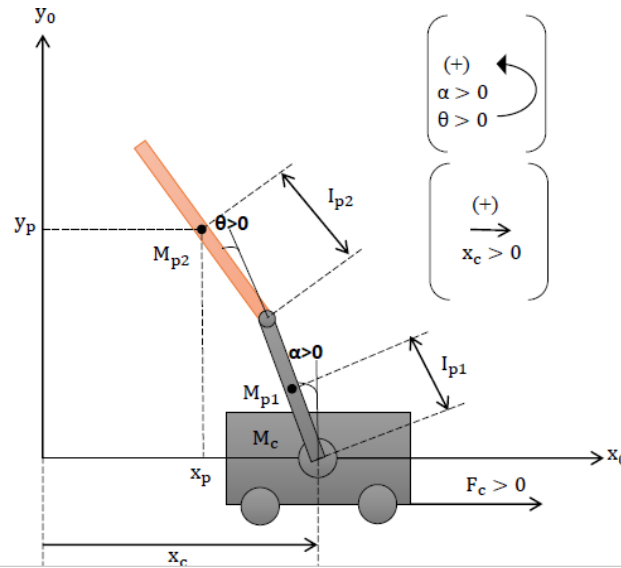
çalışmaları için teorik altyapı oluşturulmuştur. Böylelikle gerek tasarlanacak kontrolcü performansları, gerekse mevcut kontrolcü performanslarının iyileştirilmesi bakımından olumlu katkı sağlanmıştır.

### MATEMATİKSEL MODELLEME (MATHEMATICAL MODELLING)

Sistemin matematiksel modelinin çıkartılmasında enerji tabanlı Lagrange yaklaşımı kullanılmıştır. Lagrange 'L' ifadesi, sistemin potansiyel enerjisi ve kinetik enerjisi arasındaki fark olarak tanımlanır. Buna göre öncelikle konum ve hız denklemlerinin yazılarak sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjilerinin hesaplanması gerekmektedir.

Hareket denklemlerinin bulunması için kullanılan Lagrange yöntemi Denklem (1)'de verilmiştir. Burada  $q_i$  sistem genelleştirilmiş koordinatı,  $\dot{q}_i$  genelleştirilmiş koordinatın zamana göre birinci türevi,  $\tau_i$  i. değişkene hareket vermek için sistemin i. değişkenine uygulanan genelleştirilmiş tork ve L Lagrangian terimini ifade etmektedir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$



Şekil 1. Doğrusal tahrikli çift çubuklu ters sarkaç sistem diyagramı  
Figure 1. The free body diagram of cart-pole double inverted pendulum system

Şekil 1'de serbest cisim diyagramı görülen doğrusal tahrikli çift çubuklu ters sarkaç sisteminin araba konumu ( $x_c$ ) ve sırayla çubukların referans düzleme göre açılma konumları ( $\alpha$ ,  $\theta$ ) olmak üzere toplam üç çıkış değişkeni vardır. Diyagramdan görüldüğü üzere  $x_c$ 'nin pozitif yönü sağa,  $\alpha$  ve  $\theta$ 'nin pozitif yönü ise saat yönüne doğrudur. Sistem parametreleri Çizelge 1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çubukların yatay ve dikey eksenlerdeki konumları sırasıyla Denklem (2)'de verilmiştir.

$$x_{p1} = x_c - l_{p1} \sin \alpha \quad (2a)$$

$$y_{p1} = l_{p1} \cos(\alpha) \quad (2b)$$

$$x_{p2} = x_c - L_{p1} \sin(\alpha) - l_{p2} \sin(\alpha + \theta) \quad (2c)$$

$$y_{p2} = L_{p1} \cos(\alpha) + l_{p2} \cos(\alpha + \theta) \quad (2d)$$

Çubukların hız denklemleri konum denklemlerinin türevi alınarak Denklem (3)'de verilmiştir.

$$\dot{x}_{p1} = \dot{x}_c - l_{p1} \cos(\alpha) \dot{\alpha} \quad (3a)$$

$$\dot{y}_{p1} = -l_{p1} \sin(\alpha) \dot{\alpha} \quad (3b)$$

$$\dot{x}_{p2} = \dot{x}_c - L_{p1} \cos(\alpha) \dot{\alpha} - l_{p2} \cos(\alpha + \theta) (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \quad (3c)$$

$$\dot{y}_{p2} = -L_{p1} \sin(\alpha) \dot{\alpha} - l_{p2} \sin(\alpha + \theta) (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \quad (3d)$$

**Çizelge 1.** Model parametreleri*Table 1. Model parameters*

| Parametre Adı | Parametre Açıklaması  | Parametrenin Sayısal Değeri                          |
|---------------|---|--|
| $m_c$         | Arabanın kütlesi  | 1,095 kg   |
| $m_{p1}$      | Birinci çubuğun kütlesi   | 0,096 kg   |
| $m_{p2}$      | İkinci çubuğun kütlesi  | 0,120 kg   |
| $L_{p1}$      | Birinci çubuğun uzunluğu  | 0,310 m  |
| $L_{p2}$      | İkinci çubuğun uzunluğu   | 0,330 m  |
| $l_{p1}$      | Birinci çubuğun ağırlık merkezinden bağlı olduğu mafsala olan uzaklık | 0,160 m  |
| $l_{p2}$      | İkinci çubuğun ağırlık merkezinden bağlı olduğu mafsala olan uzaklık  | 0,150 m  |
| $b_1$         | Birinci döner eklemdeki viskoz sürtünme katsayısı                     | 0,000565 N/(rad/s)                                   |
| $b_2$         | Birinci ve ikinci çubuk arasındaki viskoz sürtünme katsayısı          | 0,000072 N/(rad/s)                                   |
| $J_1 - J_2$   | Her bir çubuğun atalet momenti  | $J_1=0,022962$<br>$J_2=0,002972$<br>Nms <sup>2</sup> |
| $c$           | Araba ile yüzey arasındaki viskoz sürtünme katsayısı                  | 0,001 Nms  |
| $c_1$         | Birinci döner eklemdeki Coulomb sürtünme katsayısı                    | 0,0004512 N/(rad/s)                                  |
| $c_2$         | Birinci ve ikinci çubuk arasındaki Coulomb sürtünme katsayısı         | 0,0000452 N/(rad/s)                                  |
| $F$           | Sisteme uygulanan kuvvet  | -  |

Sistemdeki toplam kinetik enerjiyi arabanın ve her bir çubuğun ayrı ayrı kinetik enerjileri oluşturur. Araba yatay ekseninde doğrusal hareket ettiğinden sadece bu ekseninde öteleme hareketinden kaynaklı bir kinetik enerjisi vardır. Çubuklar hem öteleme hem de dönme hareketi yaptığından toplam kinetik enerjilerini de bu hareketlerden kaynaklı öteleme ve dönme kinetik enerjisi oluşturmaktadır. Arabanın ve çubukların kinetik enerjileri:

$$KE_{araba} = \frac{1}{2} m_c \dot{x}_c^2 \quad (4a)$$

$$KE_1 = \frac{1}{2} m_{p1} \dot{x}_c^2 + \frac{1}{2} (m_{p1} l_{p1}^2 + J_1) \dot{\alpha}^2 - m_{p1} \dot{x}_c l_{p1} \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (4b)$$

$$KE_2 = \frac{1}{2} m_{p2} \dot{x}_c^2 + \frac{1}{2} m_{p2} L_{p1}^2 \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} m_{p2} l_{p2}^2 (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2 - m_{p2} \dot{x}_c L_{p1} \dot{\alpha} \cos \alpha \quad (4c)$$

$$- m_{p2} \dot{x}_c l_{p2} (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \cos(\alpha + \theta) + m_{p2} L_{p1} \dot{\alpha} l_{p2} (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \cos(\theta c + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2$$

Araba yalnızca yatay ekseninde hareket ettiği için arabadan kaynaklanan potansiyel enerji sıfırdır. Sistemin potansiyel enerjisini sadece çubuklar oluşturur ve çubukların potansiyel enerjileri:

$$PE_{toplam} = PE_1 + PE_2$$

$$PE_1 = m_1 g l_1 \cos \theta_1 \quad (5)$$

$$PE_2 = m_2 g L_1 \cos \theta_1 + m_2 g l_2 \cos \theta_2$$



ÇTS sistemi genelleştirilmiş koordinatı (mafsal değişkenleri):  $q = [x_c \ \alpha \ \theta]$  ve ÇTS sistemi genelleştirilmiş tork vektörü:  $\tau = [\tau_1 \ 0 \ 0]$  şeklindedir. Belirlenen her bir sistem değişkeni için Denklem (1) uygulanır. Her bir değişken için bu eşitliğin uygulanması sonucu doğrusal olmayan üç denklem elde edilir. Bu denklemler sistemin dinamiğini veren diferansiyel denklemlerdir.

İlk olarak  $x_c$  durum değişkeni eşitliğe uygulanırsa Denklem (6)'daki ifade elde edilir.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_c} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_c} = F_c - c\dot{x}_c \quad (6)$$

$L$  yerine yazılıp, Denklem (6) düzenlenirse:

$$\ddot{x}_c (m_c + m_{p1} + m_{p2}) - \ddot{\alpha} \cos \alpha (m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}) + \dot{\alpha}^2 \sin \alpha (m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}) - (\ddot{\alpha} + \ddot{\theta}) \cos(\alpha + \theta) m_{p2}l_{p2} + \sin(\alpha + \theta) (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2 m_{p2}l_{p2} = F_c - c\dot{x}_c \quad (7)$$

$\alpha$  ve  $\theta$  durum değişkenleri için sırasıyla Denklem (1) uyguladığında Denklem (8) ve (9)'daki ifadeler elde edilir.

$$\begin{aligned} & \ddot{\alpha} (m_{p1}l_{p1}^2 + J_1 + m_{p2}L_{p1}^2 + m_{p2}l_{p2}^2 + J_2 + 2m_{p2}L_{p1}l_{p2} \cos \theta) \\ & - \ddot{x}_c (\cos \alpha (m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}) + m_{p2}l_{p2} \cos(\alpha + \theta)) \\ & + (m_{p2}l_{p2}^2 + J_2 + m_{p2}L_{p1}l_{p2} \cos \theta) \ddot{\theta} - 2m_{p2}L_{p1}l_{p2} \dot{\alpha} \dot{\theta} \sin \theta \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & - (m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}) g \sin \alpha - m_{p2}g l_{p2} \sin(\alpha + \theta) - m_{p2}L_{p1}l_{p2} \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ & = -b_1 \dot{\alpha} - c_1 \text{sign}(\dot{\alpha}) - b_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta}) - c_2 \text{sign}(\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \\ & \ddot{\theta} (m_{p2}l_{p2}^2 + J_2) - \ddot{x}_c \cos(\alpha + \theta) m_{p2}l_{p2} + (m_{p2}L_{p1}l_{p2} \cos \theta + m_{p2}l_{p2}^2 + J_2) \ddot{\alpha} \\ & + m_{p2}L_{p1}l_{p2} \dot{\alpha}^2 \sin \theta - m_{p2}g l_{p2} \sin(\alpha + \theta) = -b_2 (\dot{\theta} - \dot{\alpha}) - c_2 \text{sign}(\dot{\theta} - \dot{\alpha}) \end{aligned} \quad (9)$$

Denklem (7), (8) ve (9) sistemin matematiksel modelini oluşturmaktadır. Bu üç doğrusal olmayan denklem sistemin hareket denklemleridir. Sistemi tanımlayan denklemlerin doğrusal olmadıkları görülmektedir ve bu sebeple analiz, benzetim ve denetleyici tasarımının yapılabilmesi için denklemlerin doğrusallaştırılmaları gerekmektedir (Kizir, 2019). Sistemin kararlı ve kararsız olmak üzere iki denge noktası vardır:  $\alpha = \pi$ ,  $\theta = 0$  (çubuklar aşağı yönde ve sistem kararlı),  $\alpha = 0$ ,  $\theta = 0$  (çubuklar yukarı yönde ve sistem kararsız). Bu çalışmada ele alınan kontrol problemi kararsız denge noktasında geçerlidir. Dolayısıyla doğrusallaştırma bu denge noktası için Denklem (10)' da verilen küçük açı yaklaşımı kullanılarak yapılmış ve Denklem (11)'deki doğrusal model elde edilmiştir.

$$\sin \alpha \approx \alpha, \sin \theta \approx \theta, \sin(\alpha + \theta) \approx \alpha + \theta$$

$$\cos \alpha \approx \cos \theta \approx 1, \cos(\alpha + \theta) \approx 1 \quad (10)$$

$$\dot{\alpha}^2 \approx \dot{\theta}^2 \approx 0, (\dot{\alpha} + \dot{\theta})^2 \approx 0$$

$$F_c = (m_c + m_{p1} + m_{p2}) \ddot{x}_c - (m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1} + m_{p2}l_{p2}) \ddot{\alpha} - m_{p2}l_{p2} \ddot{\theta} + c\dot{x}_c \quad (11a)$$

$$0 = -(m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1} + m_{p2}l_{p2}) \ddot{x}_c + (m_{p1}l_{p1}^2 + J_1 + m_{p2}L_{p1}^2 + m_{p2}l_{p2}^2 + J_2 + 2m_{p2}L_{p1}l_{p2}) \ddot{\alpha} + (m_{p2}l_{p2}^2 + J_2 + m_{p2}L_{p1}l_{p2}) \ddot{\theta} - g(m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}) \alpha - gm_{p2}l_{p2}(\alpha + \theta) + b_1 \dot{\alpha} + b_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \quad (11b)$$

$$0 = (m_{p2}l_{p2}^2 + J_2) \ddot{\theta} - m_{p2}l_{p2} \ddot{x}_c + (m_{p2}l_{p2}^2 + J_2 + m_{p2}L_{p1}l_{p2}) \ddot{\alpha} - gm_{p2}l_{p2}(\alpha + \theta) + b_2 (\dot{\theta} - \dot{\alpha}) \quad (11c)$$

Elde edilen doğrusal modelin matris formunda gösterimi Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \alpha_0 & -(\alpha_1 + \alpha_2) & -\alpha_2 \\ -(\alpha_1 + \alpha_2) & (\alpha_3 + 2\alpha_4) & (\alpha_5 + \alpha_4) \\ -\alpha_2 & (\alpha_5 + \alpha_4) & \alpha_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_c - c\dot{x}_c \\ \alpha_1 g \alpha + \alpha_2 g(\alpha + \theta) - b_1 \dot{\alpha} - b_2 (\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \\ \alpha_2 g(\alpha + \theta) - b_2 (\dot{\theta} - \dot{\alpha}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$(a_0 = m_c + m_{p1} + m_{p2}, a_1 = m_{p1}l_{p1} + m_{p2}L_{p1}, a_2 = m_{p2}l_{p2}, a_3 = m_{p1}l_{p1}^2 + J_1 + m_{p2}L_{p1}^2 + m_{p2}l_{p2}^2 + J_2,$$

$$a_4 = m_{p2}L_{p1}l_{p2}, a_5 = m_{p2}l_{p2}^2 + J_2)$$

Arabalı çift ters sarkaç sisteminin durum değişkenleri araba konumu – hızı ve her iki çubuğun açısız konumu – hızıdır. Çıkış değişkenleri ise araba konumu ve çubukların açısız konumudur. Bu değişkenler Denklem (13)' de verilmiştir. Bu değişkenler arasında gerekli değişken dönüşümleri Denklem (14)'de verilen şekilde yapılmalı ve denklemler buna göre yeniden düzenlenmelidir.

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c \\ \alpha \\ \theta \\ \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad y = [x_c \quad \alpha \quad \theta] \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_5 &= x_6 \end{aligned} \quad (14)$$

Denklem (12), sistemin durum uzay formunda ifade edilebilmesi için Denklem (15)'de görülen hale getirilir.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \text{inv} \begin{bmatrix} \alpha_0 & -(\alpha_1 + \alpha_2) & -\alpha_2 \\ -(\alpha_1 + \alpha_2) & (\alpha_3 + 2\alpha_4) & (\alpha_5 + \alpha_4) \\ -\alpha_2 & (\alpha_5 + \alpha_4) & \alpha_5 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} F_c - c\dot{x}_c \\ \alpha_1 g \alpha + \alpha_2 g(\alpha + \theta) - b_1 \dot{\alpha} - b_2(\dot{\alpha} - \dot{\theta}) \\ \alpha_2 g(\alpha + \theta) - b_2(\dot{\theta} - \dot{\alpha}) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Denklem (15)'den çıkarılan denklemler durum değişkenlerine göre düzenlenirse (Denklem (14)) ve sistem parametreleri yerine yazılırsa sistemin durum uzayı modeli Denklem (16)'da görüldüğü gibi elde edilir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1,9351 & -1,0079 & -3,9269 & -0,0032 & 0,0008 \\ 0 & 73,4070 & -154,7904 & -24,5434 & -0,2501 & 0,0950 \\ 0 & -146,8140 & 533,3715 & 49,0868 & 0,7453 & -0,3125 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0,9132 \\ 5,7078 \\ -11,4155 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad D = [000] \quad (16)$$

## SİSTEM KONTROLÜ (SYSTEM CONTROL)

Ters sarkaç sistemi doğrusal olmayan, kararsız, eksik tahrikli bir sistemdir. Bu özellikleri doğrultusunda kontrolü zor bir sistem olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla her denetleyici yapısı bu sistemin kontrolü için uygun olmamaktadır. Bu çalışmada arabalı çift ters sarkaç sistemine ait dengeleme kontrol problemi üzerine odaklanılmıştır. Dengeleme problemi için durum geri beslemeli kontrol uygun denetleyici yapıları arasındadır.

Durum geri beslemeli kontrol yapısının temelinde sistemin kapalı çevrim kararsız kutuplarının sistemi kararlı hale getirecek noktalara atanması vardır. Kutup atamasının yapılabilmesi için sistemin durum değişkenlerinden ve kazanç matrisinden yararlanılmaktadır.

### LQR Kontrolör (LQR Controller)

Durum geri beslemeli denetleyici tasarımında kritik noktalardan biri kazanç ( $K$ ) matrisinin bulunmasıdır. LQR yöntemi bu amaçla kullanılan yöntemlerdendir. Bu yaklaşımda bir optimizasyon problemi çözülerek  $K$  matrisi elde edilmektedir. Denklem (17)'de verilen kontrol sinyalinin optimize edecek optimal geri besleme katsayıları maliyet fonksiyonunun ( $J$ ) minimize edilmesi ile bulunmaktadır.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (17)$$

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (18)$$

Denklem (18)'de görülen maliyet fonksiyonu  $Q$  ve  $R$  olmak üzere iki parametreye bağlı olarak değişmektedir. Bu iki parametrenin seçimine bağlı olarak uygun kazanç matrislerinin elde edilmesi sağlanmaktadır.  $Q$  pozitif yarı – tanımlı bir matristir,  $R$  ise pozitif sabit bir sayıdır. Optimum kontrol sinyali, Denklem (19)'da verilen şekilde olmalıdır.

$$u(t) = -R^{-1} B^T P(t) x(t) = -Kx(t) \quad (19)$$

Bu denklemde görülen  $P$  cebirsel değeri ise Denklem (20)'de görülen Riccati diferansiyel denklemi yardımı ile elde edilir.

$$PA + A^T - PBR^{-1}P + Q = 0 \quad (20)$$

Riccati denkleminin çözümü olan  $P$  değeri ile artık  $K$  kazanç matrisi Denklem (21)'de görüldüğü gibi bulunabilir.

$$K = R^{-1} B^T P = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6] \quad (21)$$

### LQR Kontrolör Tasarımı – Ağırlık Matrislerinin Seçimi (LQR Controller Design – The Choice Of The Weighting Matrix)

Kontrol sistemlerinde oldukça önem taşıyan kontrolör performans kriterleri mevcuttur. Bunlardan ilki: sistemin referansa yani istenen duruma gitmesi için geçen zamandır. Bu kriter regülasyonun ne kadar hızlı olduğunu gösterir. İkinci kriter ise sistemin kontrolü için harcanan enerji miktarıdır. Bu iki kriterin çalışma mantığı birbirleriyle terstir. Çünkü bir sistemden hızlı cevap alınması istenirse, kontrol sinyalinin yüksek tutulması gerekir bu da harcanan enerji miktarının artması anlamına gelmektedir. Ya da harcanan enerjinin az olması isteniyorsa, sistemden istenen cevap daha uzun sürede alınacaktır.

Optimizasyon probleminin çözümü  $Q$  ve  $R$  parametrelerine bağlıdır. Bu parametrelerin seçiminin kontrolör performansına etkisi fazladır dolayısıyla seçimleri de oldukça önem taşımaktadır (Kizir, 2008).

Kontrolör tasarlanırken  $Q = R$  seçilirse, sistemin kontrolü için harcanan enerji miktarı ile sistemin referansa gitmesi için geçen zaman eşit önemdedir.  $Q > R$  ise sistemin referansa olabildiğince hızlı gitmesi daha önemlidir. Yani sistemden hızlı cevap alabilmek için harcanacak enerjinin fazla olması göz ardı edilmektedir.  $Q < R$  durumunda ise harcanan enerji miktarının az olması istenmektedir. Az enerji harcanması için sistem cevabının yavaş olması sorun teşkil etmemektedir (Yaren, 2018).  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrislerinin seçiminde bu durumlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Kontrol sinyalinin durumu ise  $R$  parametresine göre değişmektedir.  $R$  parametresi ne kadar yüksek değerlikte seçilirse, üretilecek kontrol sinyali de o kadar düşük olacaktır.  $R$ 'nin seçimi kontrol sinyal genliğinin ayarlanmasında pratiklik sağlamaktadır.

$Q$  matrisi, sistem durum değişkenlerinin her birinin ağırlık katsayısını içermektedir (Li, 2013). Bir durum değişkeninin ağırlık katsayısı ne kadar fazla ise o değişkenin kontrolü için o kadar fazla enerji gerekmektedir. Yani ağırlık katsayısı fazla olan değişkenin kontrolüne daha fazla ağırlık verilmektedir. Burada sistem özelliklerini bilmek önem taşımaktadır. Çünkü sistem durum değişkenlerinin özelliklerine göre hangi değişkene daha fazla ağırlık verilmesi gerektiği araştırmacı tarafından öngörülmelidir.

Optimal ve kararlı bir kontrolör sağlanmasına rağmen LQR, standart bir kontrol çözümü sağlayamaz. Optimizasyon probleminin birden fazla çözümü olabilir. Bu nedenle deneme yanılma yaparak istenen kontrol performansı elde edilebilir.  $Q$  ve  $R$  tasarım parametrelerinin farklı seçimleri, kapalı çevrim sistem için farklı kontrol performansları sağlamaktadır (Zhang ve Zhang, 2012).

LQR kontrolörün dezavantajı, sistem kontrolü için en uygun  $Q$  ve  $R$ 'yi verecek kesin bir yöntem bulunmamasıdır. Kullanılan yöntemler ise araştırmacı için doğru başlangıç noktasını belirlemeye yardımcı olmaktadır. Araştırmacı, başlangıç noktasından başlayarak en uygun  $Q - R$ 'yi sistem modeli üzerinde testler gerçekleştirerek bulmaya çalışır. Tasarım kriterlerine en uygun kontrolörün elde edilebilmesi için ağırlık matrislerinde ayarlama yapar. Başlangıç noktasının doğru olması çözümü hızlı bir şekilde bulabilmek açısından araştırmacıya oldukça avantaj sağlamaktadır.

Tasarım hedeflerini karşılayabilecek bir ağırlık matrisi seçimi yapabilmek için kullanılan birkaç temel yöntem mevcuttur. Bunlardan ilki ve en basit olanı Q matrisinin, sistemin C durum matrisine bağlı olarak Denklem (22)'de görüldüğü gibi  $C^T C$  şeklinde seçilmesidir.

$$Q = C^T C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Ağırlık matrisi seçiminde kullanılan bir diğer yöntem literatürde "Bryson's Rule" (Bryson ve Ho, 1975) olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde Q ve R, Denklem (23)'de verilen ifadelerle seçilebilir. İlk yöntemde sadece sistem çıkışlarına ağırlık katsayısı verilmişti fakat sistemin sadece çıkışlarına değil tüm değişkenlerine ağırlık verilebilir. n durum değişkenli bir sistemde her bir durum değişkeninin ağırlık katsayısı o değişkenin maksimum kabul edilebilir hata miktarına göre belirlenebilmektedir. R değerinin belirlenmesi ise kontrol sinyalinin maksimum değerine bağlıdır.

$$Q_{ii} = \frac{1}{(x_{i\max})^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad R = \frac{1}{(u_{\max})^2} \rho \quad (23)$$

Örneğin; bir sistemdeki araba konumu için maksimum kabul edilebilir hata miktarı 0.1 m olsun. Bu durumda "Bryson's Rule" yöntemine göre Q matrisinde araba konumunun ağırlık katsayısı 100 seçilebilir. Burada önemli olan değişkenlerin birimlerine dikkat ederek katsayıların belirlenmesidir. Ayrıca sisteme uygulanabilecek maksimum gerilim değerinin 7 V olduğunu varsayalım. Bu durumda R parametresi (1/49) olarak bulunabilir. Bu yöntem uygun kontrolör seçimi için olası başlangıç noktasını verir. Sistem çıkışına göre istenen çıkışın elde edilebilmesi için de parametre ayarı yapılır.

#### Durum Geri Besleme Kazancının Bulunması (Determination Of The State Feedback Gain)

Kontrolör tasarımı için sistem yapısının analizi gerekmektedir. Çift çubuklu ters sarkaç sistemine bakıldığında bazı kısıtlar olduğu görülmektedir. Arabanın yatayda hareket edeceği alan sınırlıdır. Arabanın hareket alanına göre kontrolörün davranış biçimi de değişecektir. Araba konumunun sınırı olduğu için bu sistem değişkeninin ağırlık katsayısı çok düşük tutulmamalıdır. Çubuk açılarının ve araba konumunun dengeleme probleminin çalışma aralığında bulunması gerekmektedir. Yani bu sistem çıkışlarının fiziksel sınırları mevcuttur. Fakat hız değişkenleri için bir sınırlama söz konusu değildir. Dolayısıyla pozisyon değişkenlerinin ağırlık katsayıları hız değişkenlerine göre çok yüksek tutulmalıdır.

Çubuklar düşmeye başlarsa buna bağlı olarak arabanın doğrusal hızı çok hızlı bir şekilde değişecektir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle bu durumun engellenmesi için araba hız değişkeninin ağırlık katsayısı olabildiğince düşük seçilmelidir.

Kontrolör tasarımı için çubukların açıları için kabul edilebilir maksimum hatanın 0,02 rad olduğunu varsayalım. Araba konumu ise 0,01 m olsun. Bu durumda Q matrisi Denklem (24)'deki gibi elde edilir.

$$Q_{11} = \frac{1}{(0,01)^2} = 10000, Q_{22} = Q_{33} = \frac{1}{(0,02)^2} = 2500$$

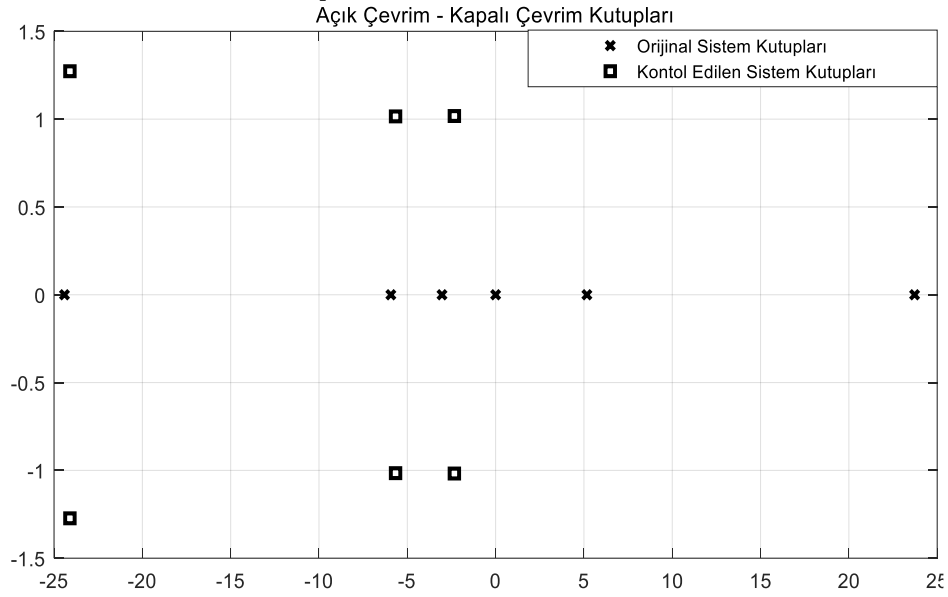
$$Q = \begin{bmatrix} 10000k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2500k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2500k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

k katsayısı (1/100) olarak seçilirse Q matrisinin güncel hali Denklem (25)'de görüldüğü gibi olur. Ayrıca R = 1 olarak seçilirse bu ağırlık matrislerine göre kontrolör performansı incelenebilir.

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad R=1 \quad (25)$$

Denklem (25)'de verilen Q ve R parametrelerine göre elde edilen kazanç matrisi sistem Simulink modeline uygulanmış ve sistemin kontrolünün sağlandığı görülmüştür. Sisteme uygulanan kazanç matrisi Denklem (26)'da verilmiştir.

$$K=[10 \ -42,47 \ -202,34 \ 7,15 \ -15,99 \ -12,65] \quad (26)$$



Şekil 2. Kararlı – kararsız sistem kutupları

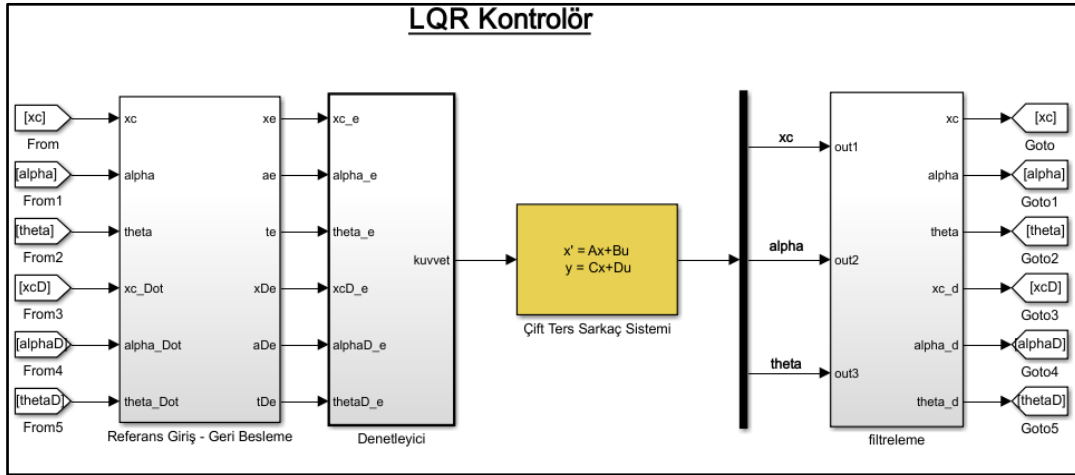
Figure 2. Stable – unstable system poles

Şekil 2'de orijinal sistem kutupları ile kontrol sonucu elde edilen kutuplar görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere kutuplar kontrol sonucunda kararsız noktalardan kararlı noktalara taşınmıştır. Yani durum geri beslemeli kontrol yapısının temelinde olduğu gibi sistemin durum değişkenlerinden ve kazanç matrisinden yararlanılarak kontrol sonucu sistemin kararsız kutupları sistemi kararlı hale getirecek noktalara atanmıştır. Elde edilen kazanç matrisi ile sistem kararlı hale gelmiştir fakat bu çözüm kontrol probleminin tek çözümü değildir. Farklı Q ve R seçimleri ile farklı performansta denetleyiciler elde edilebilir. Farklı Q ve R seçimlerinin sistem kontrolü üzerinde etkileri benzetim modelinde incelenecektir.

## BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

### LQR Simulink Modeli (LQR Simulink Model)

Durum uzayı modeli sistemin gerçek davranış biçimini içerdiğinden; Simulink ortamında arabalı çift ters sarkaç sisteminin durum uzay matrislerinin benzetim modelinin oluşturulması ile sistem analizi kolaylıkla yapılabilir. Ayrıca bu benzetim modeline kontrolör yapısının eklenmesi ile de tasarlanan kontrolörün performansı incelenebilir ve gerekli düzeltmeler kolaylıkla yapılabilir.



Şekil 3. LQR kontrolör Simulink modeli

Figure 3. LQR controller Simulink model

LQR kontrolör yapısının oluşturulduğu Simulink modeli Şekil 3’de görülmektedir. Çift ters sarkaç sisteminin üç çıkışı vardır. Bunlar: arabanın konumu, birinci ve ikinci sarkaç açılarıdır. Dolayısıyla Simulink modelindeki durum uzayı bloğunun çıkışından da bu üç çıkış değişkeni elde edilir. Fakat durum geri beslemeli kontrolcünün sisteme uygulanabilmesi için tüm değişkenlerin bilinmesi gereklidir. Bu nedenle Simulink modelindeki filtreleme bloğunda, pozisyon bilgilerinin türevi ikinci dereceden alçak geçiren türev filtresi ile alınarak hız bilgileri elde edilmektedir. Böylece sistemin tüm durum değişkenleri erişilebilir durumdadır ve tam geri besleme sağlanabilmektedir. (Gerçek zamanlı uygulamalarda ölçüm gürültüleri, filtre gecikmeleri gibi kontrolör performansını olumsuz etkileyecek etkileri yok etme amacıyla filtreleme bloğu geliştirilebilir; fakat bu çalışmada ikinci dereceden alçak geçiren türev filtresi yeterlidir.)

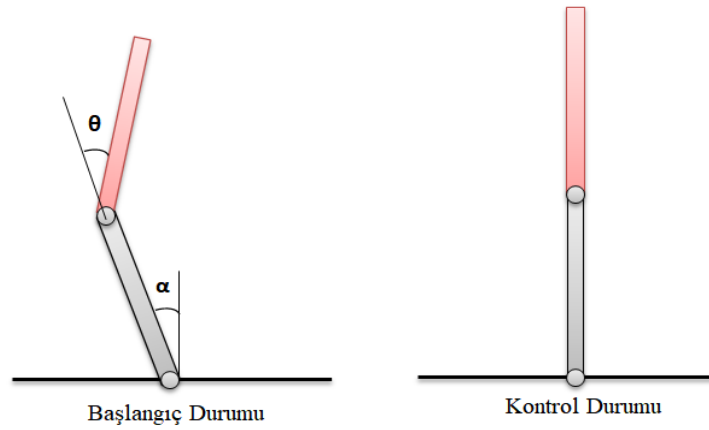
Geri beslenen durum değişkenlerinin referanslarla karşılaştırılması ile her bir durum için hata bilgisi elde edilir. Bu hata verileri de kazanç matrisi ile çarpılır. Kontrolörün performansı direkt olarak bu kazanç matrisi ile ilişkilidir. Kazanç matrisi de Q ve R ağırlık matrislerine bağlı olarak elde edilmektedir. Fakat ilk elde edilen kazanç matrisinin performansının çok iyi olması beklenemez. Çünkü daha önce bahsedilen ağırlık matrislerinin seçimi için izlenebilecek yollar sadece başlangıç noktasının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu başlangıç noktasından yola çıkılarak benzetim ortamında kontrolörün davranış biçimi incelenir ve iyileştirilmesi için ağırlık matrislerinde gerekli değişiklikler yapılarak, sonuçlar gözlenir.

Benzetim ortamında, ağırlık katsayılarındaki değişimlerin değişkenlerin davranış biçimini nasıl etkilediği, kontrol sinyalindeki değişimler, değiştirilen koşulların kontrolörün performansına etkisi kolay bir şekilde gözlenebilir. Gözlenen durumlara göre de kontrolör tasarımı iyileştirilebilir. Aynı zamanda gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için de benzetim çalışmaları referans niteliğindedir. Çünkü benzetim ortamında kontrolörün davranış biçiminin analizi yapılır ve gerçek zamanlı uygulamada da bu davranış biçiminin görülmesi beklenir. Beklenen davranış biçimine göre sistem üzerinde gerekli düzenlemeler yapılır.

### LQR Kontrolör Benzetim Sonuçları (Simulation Results Of LQR Controller)

Sistem belirli başlangıç koşulunda iken kontrolör farklı ağırlık matrisleri ile uygulanacaktır. Böylece farklı ağırlık matrislerinin kontrolör performansına etkisinin gözlenebilmesi amaçlanmıştır.

Başlangıç koşulu  $[0 \ 0,1 \ -0,05 \ 0 \ 0 \ 0]$  şeklindedir. Birinci çubuğun başlangıç değeri 0,1 radyan, ikinci çubuğun başlangıç değeri -0,05 radyan, diğer durum değişkenlerinin ise 0’dır. Şekil 4’de sistemin bu koşullardaki başlangıç durumu ve kontrolörün devreye girmesiyle sistemin ne duruma geleceği görülmektedir.



Şekil 4. Sistemin  $[0 \ 0,1 \ -0,05 \ 0 \ 0 \ 0]$  başlangıç koşulu ve kontrol durumu

Figure 4. Initial condition as  $[0 \ 0,1 \ -0,05 \ 0 \ 0 \ 0]$  and control status of the system

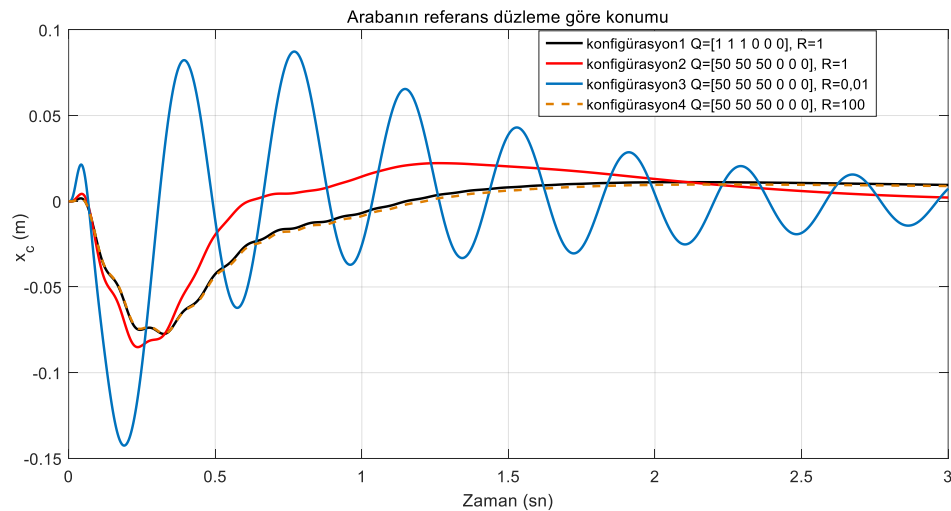
### Farklı Ağırlık Matrisleri (Different Weight Matrices)

Farklı Q ve R matrisleri için verilen başlangıç koşulunda kontrolörün davranışı incelenecektir. Kontrolör tasarımında, en uygun olabilecek ağırlık matrislerine karar verilmişti, burada amaç ağırlık matrislerinin etkisini gözleyebilmektir. İncelenen konfigürasyonlar sırasıyla  $\{(Q = \text{diag}(1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 1)$ ,  $(Q = \text{diag}(50 \ 50 \ 50 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 1)$ ,  $(Q = \text{diag}(50 \ 50 \ 50 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 0,01)$ ,  $Q = \text{diag}(50 \ 50 \ 50 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 100\}$  şeklindedir. Bu konfigürasyonlar altında tüm sistem değişkenlerinin yanıtı ve kontrol sinyalinin durumu ayrıntılı bir şekilde Şekil 5 – 11 arası çizdirilmiş ve gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca Çizelge 2’de elde edilen kazanç matrisleri verilmiştir.

Çizelge 2. Farklı konfigürasyonlardaki kazanç matrisleri

Table 2. Gain matrices in different configurations

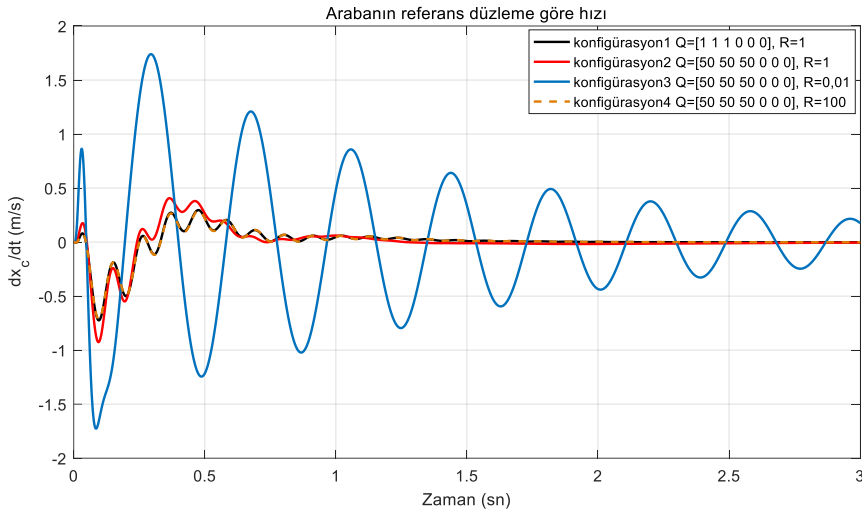
| Konfigürasyon | $K_{x_c}$ | $K_{\alpha}$ | $K_{\theta}$ | $K_{\dot{x}_c}$ | $K_{\dot{\alpha}}$ | $K_{\dot{\theta}}$ |
|---------------|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 1             | 1.00      | -22.3        | -183.2       | 0.76            | -11.48             | -10.76             |
| 2             | 7.07      | -36.97       | -197.81      | 5.20            | -14.75             | -12.16             |
| 3             | 70.7      | -195.4       | -363.88      | 50.66           | -49.47             | -27.15             |
| 4             | 0.70      | -21.63       | -182.55      | 0.54            | -11.32             | -10.69             |



Şekil 5.  $x_c$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı

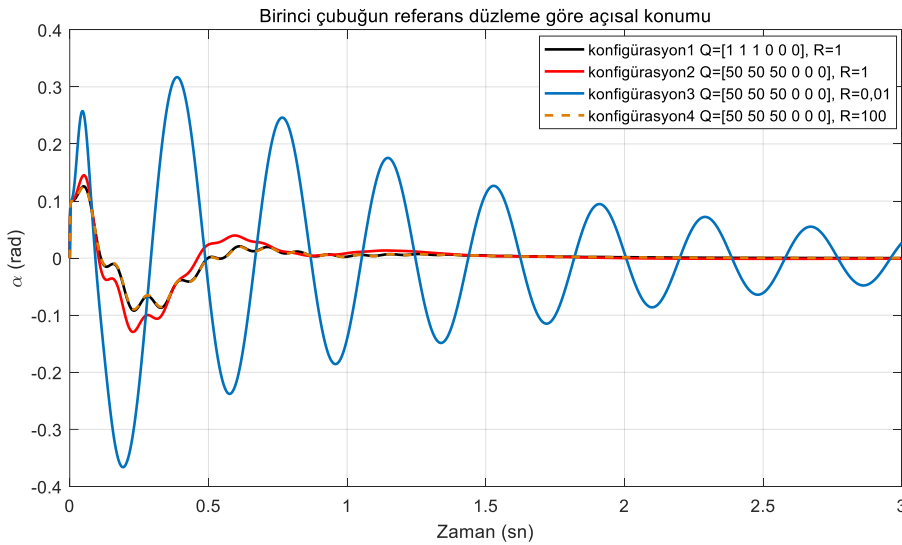
Figure 5. Response of  $x_c$  system variable in different configurations

İlk olarak en basit şekilde  $Q = \text{diag}(1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 1$  olarak seçilmiştir (konfigürasyon1). (Araba konumu ile sarkaçların açılarının ağırlıkları 1 alınmıştır.) Bu konfigürasyon için Şekil 5-10 arası sistem değişkenleri incelendiğinde her bir değişkenin belirli bir süre sonra referans noktasına (0) oturduğu gözlenmektedir. Yani Şekil 4’de görülen kontrol durumu elde edilmektedir. Çubukların denge konumuna gelirken fazla salınım yaptığı görülmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur çünkü her salınım da kontrolör bu salınımı yok edecek şekilde kontrol sinyali üretir ve bu da sistemde harcanacak enerjinin fazla olmasına sebep olur. Arabanın ise denge konumuna gelme zamanı daha da azaltılabilir çünkü araba konumu için yerleşme zamanı fazladır. Ayrıca farklı ağırlık matrisleri ile çubukların açı grafiklerindeki aşım da azaltılabilir. Burada önemli olan performans kriterlerine göre en iyi performansı sağlayacak ağırlık matrislerini bulabilmektir.



Şekil 6.  $\dot{x}_c$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı  
Figure 6. Response of  $\dot{x}_c$  system variable in different configurations

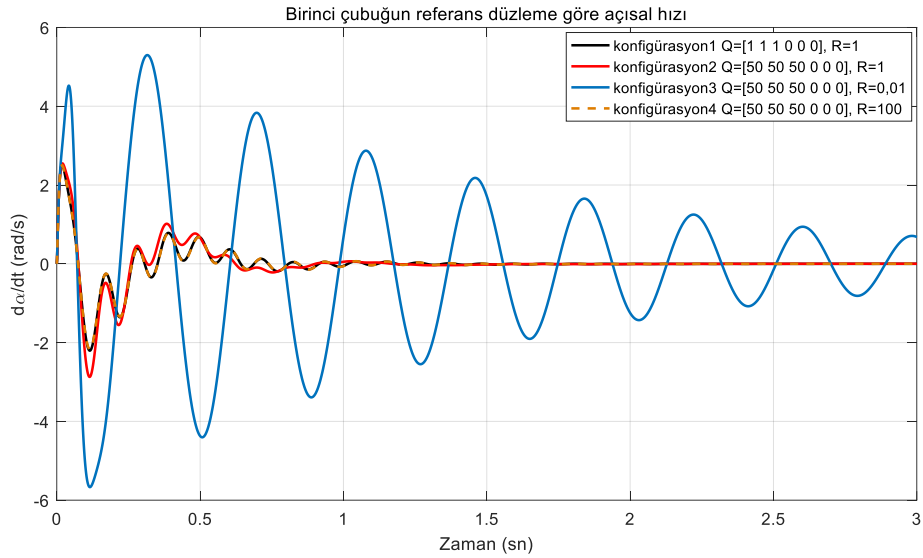
İkinci olarak  $Q = \text{diag}(50 \ 50 \ 50 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 1$  olarak seçilmiştir (konfigürasyon2). Sistem durum değişkenlerinin ağırlık katsayıları aynı derecede arttırılmış, R ise sabit kalmıştır. Burada sistem değişkenlerinin ağırlık katsayılarının etkisinin gözlenebilmesi amaçlanmıştır.  $x_c$  değişkeninin yanıtı ilk iki konfigürasyon için karşılaştırıldığında (Şekil 5), ağırlık katsayısının artması sonucu yerleşme zamanının önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Ayrıca aşım artmıştır fakat bu artış büyük miktarda olmamıştır.



Şekil 7.  $\alpha$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı  
Figure 7. Response of  $\alpha$  system variable in different configurations



Ağırlık katsayısının 50 olarak seçildiği durumda birinci ve ikinci çubukların pozisyon verilerine bakıldığında çubukların dengelenirken yaptığı salınımın ilk duruma göre azaldığı görülmektedir (Şekil 7 ve 9). İki durum arasında yerleşme zamanı açısından önemsenecek bir fark yoktur. Aşımında ise küçük bir miktar artış oluşmuştur.

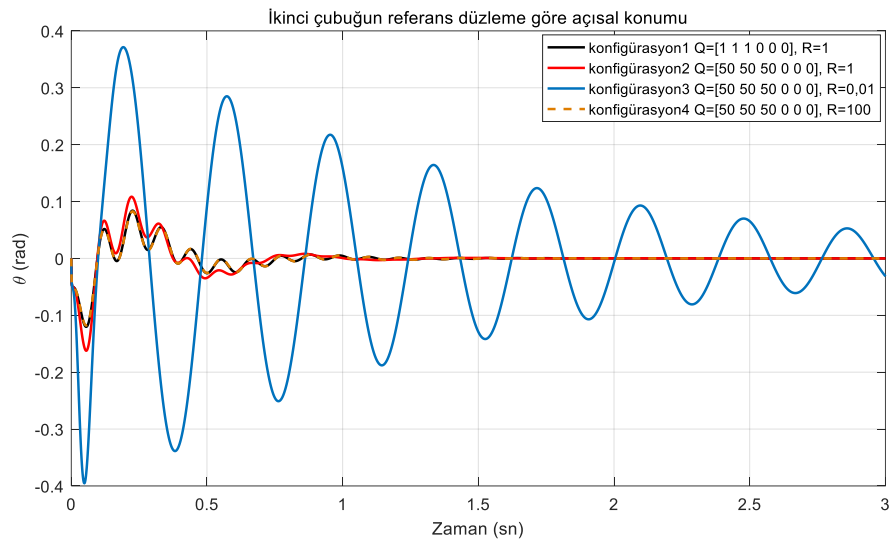


Şekil 8.  $\dot{\alpha}$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı

Figure 8. Response of  $\dot{\alpha}$  system variable in different configurations

Hız bilgisi pozisyon bilgisine bağlı olarak üretilir. Dolayısıyla pozisyondaki değişiklikler hız bilgisine de yansiyacaktır. Bu yüzden pozisyonda olduğu gibi hızda da ilk duruma göre salınım azalmıştır.

Q matrisi R'ye göre büyük seçildiğinde, denetleyicinin hızı ön plana çıkarılmaktadır. Yani sistemde hızlı regülasyon sağlamak için yüksek kontrol sinyali kullanılmasına tolerans gösterilmektedir. Her iki durumdaki kontrol sinyali incelendiğinde;  $Q > R$  durumunda daha yüksek genlikli kontrol sinyalinin olduğu görülmektedir. Bahsedilen durum karşılaştırma ile gözlenmiştir.

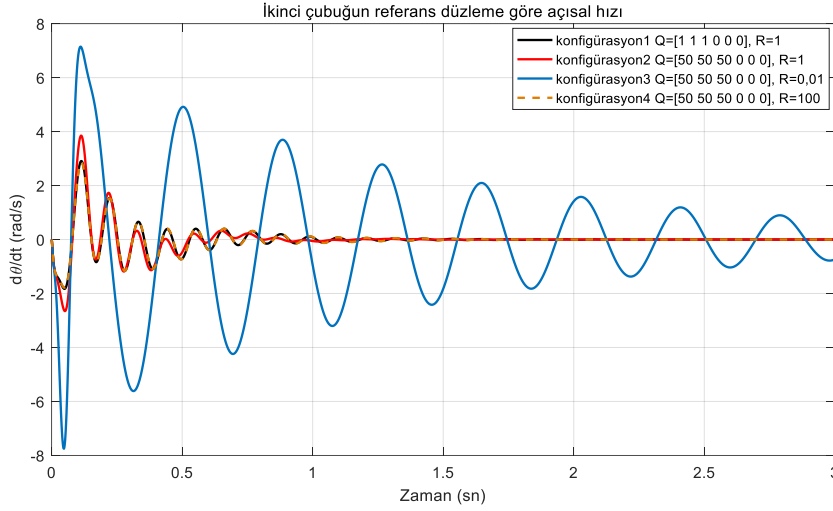


Şekil 9.  $\theta$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı

Figure 9. Response of  $\theta$  system variable in different configurations

Q = diag(50 50 50 0 0 0) ve R = 0,01 olarak seçildiğinde ise (konfigürasyon3) daha önce verilen koşullarda elde edilen sonuçlara göre tüm sistem değişkenlerinde salınımın çok fazla arttığı

görülmektedir. Çubuklar dengelenirken büyük genlikli salınımlar yapmaktadır ve kontrolör bu salınımları yok etmek için daha fazla kontrol sinyali üretmektedir. Ayrıca sistem değişkenlerinin dengelenmesi için geçen süre yani yerleşme zamanı artmıştır ve bu artış istenmeyen bir durumdur. Elde edilen sonuçlara göre bu koşullarda kontrolör dengelemeyi başarsa bile performansının başarılı olmadığı söylenebilir.

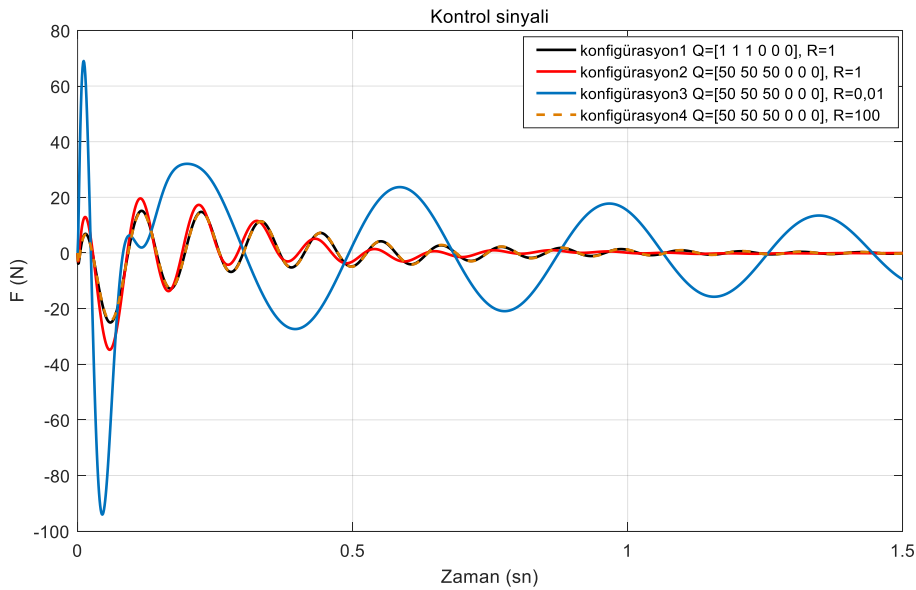


Şekil 10.  $\theta$  sistem değişkeninin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı

Figure 10. Response of  $\theta$  system variable in different configurations

Son olarak  $Q = \text{diag}(50 \ 50 \ 50 \ 0 \ 0 \ 0)$  ve  $R = 100$  olarak seçilmiştir (konfigürasyon4).  $R > Q$  durumunda regülasyonun uzun olması yani sistemin yavaş dengeye oturması tasarımcı için bir problem teşkil etmemektedir. Bu durumda sistemde az enerji harcamak önemlidir ve diğer durumların etkisi ihmal edilir.

Önceki iki durumda elde edilen kontrol sinyalleri ile bu durumda elde edilen kontrol sinyali karşılaştırıldığında, daha küçük genlikli kontrol sinyali elde edildiği görülmüştür (Şekil 11). Ayrıca yerleşme zamanı diğer durumlara göre artmıştır.



Şekil 11. Kontrol sinyalinin farklı konfigürasyonlardaki yanıtı

Figure 11. Response of control signal in different configurations

Geçici ve kalıcı durum kontrol cevap parametrelerinin (yerleşme zamanı, yükselme zamanı, maksimum aşım, kalıcı durum hatası, pik değer vb.) incelenmesi ile etki analizinin detaylandırılması mümkündür. Detaylandırmaya örnek olarak Çizelge 3 hazırlanmıştır. Görüldüğü üzere her bir konfigürasyon için sistem çıkış değişkenlerinin bazı kontrol cevap parametreleri karşılaştırılmıştır.

**Çizelge 3.** Sistem çıkış değişkenlerinin her bir konfigürasyondaki yanıt parametreleri

*Table 3. Response parameters of system output variables in each configuration*

| Çıkış Değişkeni |                | Yükselme Zamanı | Yerleşme Zamanı | Maksimum Aşım | Pik    |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|--------|
| $x_c$           | Konfigürasyon1 | 1.3081          | 3.9423          | 89.9864       | 0.0774 |
|                 | Konfigürasyon2 | 0.0015          | 3.0948          | 6.2007e+04    | 0.0851 |
|                 | Konfigürasyon3 | 0.0063          | 4.8555          | 3.6748e+03    | 0.1425 |
|                 | Konfigürasyon4 | 1.4344          | 3.6078          | 55.5372       | 0.0772 |
| $\alpha$        | Konfigürasyon1 | 1.7329e-05      | 1.7373          | 2.6851e+05    | 0.1257 |
|                 | Konfigürasyon2 | 2.1619e-06      | 1.6309          | 1.6869e+06    | 0.1451 |
|                 | Konfigürasyon3 | 9.2792e-05      | 4.8660          | 3.9988e+03    | 0.3662 |
|                 | Konfigürasyon4 | 9.7204e-06      | 1.7318          | 4.7457e+05    | 0.1247 |
| $\theta$        | Konfigürasyon1 | 2.7011e-09      | 1.1573          | 1.0682e+08    | 0.1202 |
|                 | Konfigürasyon2 | 2.2201e-08      | 0.9636          | 1.7543e+07    | 0.1623 |
|                 | Konfigürasyon3 | 1.9559e-04      | 4.8635          | 4.7499e+03    | 0.3953 |
|                 | Konfigürasyon4 | 2.2259e-09      | 1.1623          | 1.2722e+08    | 0.1180 |

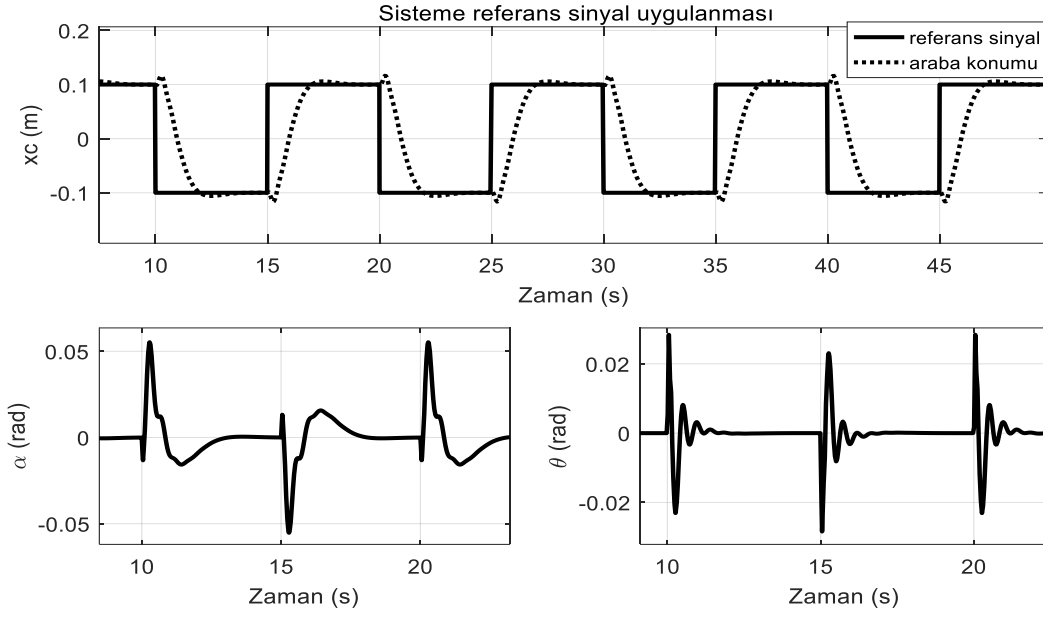
Kontrolör performans kriterlerine göre farklı Q ve R ağırlık matrisleri ile optimizasyon yapılabilir ve böylece daha iyi kontrolör performansı elde edilebilir. Yapılan karşılaştırmalarda görüldüğü gibi farklı durumların sistem üzerinde farklı etkileri vardır. Bu etkilerin istenen şekilde ortaya çıkması ise tasarımcının seçimine bağlıdır. Ayrıca ağırlık matrisleri seçimi başlığında bahsedildiği gibi sistemin davranış biçimine göre çubukların ağırlığı ile arabanın ağırlığı aynı değildir. Dolayısıyla değişkenlerin ağırlık katsayılarının ayrı ayrı değiştirilmesi ile sonuçlar gözlenerek kontrolör performansı daha da iyileştirilebilir.

#### **Sistemin Referans Sinyali Takibi (System Reference Signal Tracking)**

Sistem Denklem (26)'daki kazanç matrisinin uygulanması ile denge durumunda iken arabaya Şekil 12'de görülen referans sinyal uygulanmıştır. Kontrolörden istenen arabanın referans sinyali başarı ile takip etmesi ve bu takibi gerçekleştirirken çubukların dengesinin bozulmamasıdır. Sistem denge halinde iken arabanın hareket etmesi, çubuklar için bozucu etki oluşturacaktır. Önemli olan; oluşan bu bozucu etkiyi kontrolörün yok edebilmesidir.

Şekil 12'de referans sinyalin sisteme uygulanması sonucunda sistem çıkışlarının nasıl davrandığı görülmektedir. Görüldüğü üzere araba  $\pm 0,1$  m. referans noktalara ulaşarak referans sinyali başarı ile takip etmekte ve belirlenen süre boyunca dengede kalmaktadır. Ayrıca grafikte sisteme uygulanan referans sinyal sonucunda çubukların konumlarındaki değişimler görülmektedir.

Çubuklar arabanın referans noktasına gitmek için harekete başladığı anda salınım yapmaktadırlar. Bu salınım arabanın hareketinden doğan bozucu etki sebebiyle oluşmaktadır. Kontrolör bu salınımları uygun kontrol sinyali ile yok ederek çubukların denge halinin bozulmasını engellemiştir. Grafikte salınımlardan sonra çubukların tekrar  $0^\circ$  denge konumlarına geldiği açıkça görülmektedir.



Şekil 12. Referans sinyal uygulanması sonucunda sistem çıktıları

Figure 12. System outputs as a result of reference signal implementation

## SONUÇ (RESULT)

Bu çalışmada, kontrol sistemleri uygulamalarında oldukça tercih edilen ters sarkaç sistem türlerinden olan doğrusal tahrikli çift çubuklu ters sarkaç sisteminin Lagrange tabanlı modellenmesi detaylarıyla verilmiş, denge kontrolü tam durum geri besleme yöntemi, Bryson kuralı ve doğrusal karesel regülatör kullanılarak gerçekleştirilmiş ve benzetim çalışmaları MATLAB – Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları; gerçek zamanlı uygulanacak denge kontrol problemlerine zemin oluşturmuştur. Ayrıca LQR kontrolcü parametrelerinin etkileri detaylı bir şekilde ele alınarak kontrol algoritması tasarım süreci iyileştirilmiş ve birçok endüstriyel sistemin kontrol çalışmaları için teorik altyapı oluşturulmuştur. Böylelikle gerek tasarlanacak kontrolcü performansları, gerekse mevcut kontrolcü performanslarının iyileştirilmesi bakımından olumlu katkı sağlanmıştır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bilgiç, H. H., Conker, Ç., Yavuz, H., Şen, M. A. 2015, "Sarkaç Tipi Bir Tepe Vincinin Kontrolüne Bulanık Yaklaşım," Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, 14-17 Haziran 2015, İzmir.
- Block, D. J., 1996, "Mechanical Design and Control of the Pendubot," Yüksek Lisans Tezi, University of Illinois, Illinois.
- Bogdanov, A. 2004, "Optimal Control of a Double Inverted Pendulum on a Cart," Oregon Health and Science University, Tech. Rep. CSE-04-006, OGI School of Science and Engineering, Beaverton, OR.
- Boubaker, O. 2012, "The Inverted Pendulum: A Fundamental Benchmark in Control Theory and Robotics," In Education and e-Learning Innovations (ICEELI), 2012 International Conference, 1-3 July 2012, Sousse, Tunus, p. 1-6.
- Bryson, A. E., Ho Y.-C., 1975, "Applied optimal control: optimization, estimation, and control," Taylor & Francis Group.
- Colobert, B., 2006, "Force-Flate Based Computation of Ankle and Hip Strategies from Double-Inverted Pendulum Model," Clinical Biomechanics, vol. 21(4), p. 427-434.
- Kızır, S. 2008, "Doğrusal Olmayan Ters Sarkaç Sisteminin Tasarımı ve Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Kızir, S. 2019, "Denge Kontrol Sisteminin LQR ile Gerçek Zamanlı Durum Geri Beslemeli Kontrolü," Politeknik Dergisi.
- Li B., 2013, "Rotational Double Inverted Pendulum," Yüksek Lisans Tezi, University Of Dayton, Dayton, Unites States.
- Mifsud, A., Benallegue, M., Lamiroux, F. 2016, "Stabilization of a Compliant Humanoid Robot Using Only Inertial Measurement Units with a Viscoelastic Reaction Mass Pendulum Model," Rapport LAAS, 16063, hal-01285643.
- Nagasaki, T., Kajita, S., Yokoi, K., Kaneko, K., Hirukawa, H., Tanie, K. 2003, "Running Pattern Generation for a Humanoid Robot," Journal-Robotics Society of Japan, vol. 21(8), p.74-80.
- Özkan, B. 2009, "Mekatronik Sistemlerde Uygulanan Belli Başlı Kontrol Yöntemleri," Tubav Bilim Dergisi, Cilt:2, Sayı:3, Sayfa: 302-316.
- Poorhossein, A., Vahidian, K. A. 2010, "Design and Implementation of Sugeno Controller for Inverted Pendulum on a Cart System," In IEEE 8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, 10-11September 2010, Subotica, Serbia, p. 641-646.
- Suzuki, Y., et al. 2012, "Intermittent Control with Ankle, Hip, and Mixed Strategies during Quiet Standing: A Theoretical Proposal Based on a Double Inverted Pendulum Model," Journal of Theoretical Biology, vol. 310, p. 55-79.
- Şen, M. A., Bilgiç, H. H., Kalyoncu, M. 2016, "Çift Ters Sarkaç Sisteminin Denge ve Konum Kontrolü için Arı Algoritması ile LQR Kontrolcü Parametrelerinin Tayini," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 679, s. 53-62.
- Wanli, Z., Guoxin, L., Lirong, W. 2014, "Research on the Control Method of Inverted Pendulum Based on Kalman Filter," In Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC), IEEE 12th International Conference, 24-27 August 2014, Dalian, China, p. 520-523.
- Yaren, T. 2018, "Doğrusal Tahrikli Çift Çubuklu Ters Sarkaç Sisteminin Tasarımı ve Denge Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Zhang, J., Zhang W., 2012, "LQR Self-Adjusting Based Control for the Planar Double Inverted Pendulum," International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering, 24, 1669 – 1676.