



Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2021 - Cilt: 9 - Sayı: 2
2021 - Volume: 9 - Issue: 2

**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. Halife KODAZ

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Assoc. Prof. Dr. Omer Kaan BAYKAN

Section Editors/Alan Editörleri

Prof. Dr. A. Afşin KULAKSIZ

Prof. Dr. hsan ÖZKAN

Prof. Dr. Kürşad ERSOY

Prof. Dr. Mustafa TABAKCI

Assoc. Prof. Dr. Alpaslan YARAR

Assoc. Prof. Dr. Ömer Kaan BAYKAN

Assoc. Prof. Dr. Volkan KALEM

Assist. Prof. Dr. Alper DÖYEN

Assist. Prof. Dr. Selim DOĞAN

Advisory Board/Danışma Kurulu

Prof.Dr. Ferruh YILDIZ, Konya Technical University

Prof.Dr. Reşat ULUSAY, Hacettepe University

Prof.Dr. Ibaraki SOICHI, Kyoto University

Prof.Dr. Matchavariani LIA, Tbilisi State University

Prof.Dr. Seref SAGIROGLU, Gazi University

Prof.Dr. Vijay P. SINGH, Texas A and M University

Prof.Dr.-Ing. Rudolf STAIGER, Bochum University of Applied Sciences

Prof.Dr. Chryssy POTSIU, National Technical University of Athens

Prof.Dr. Lena HALOUNOVA, Czech Technical University

Prof.Dr. Petros PATIAS, The Aristotle University

Prof.Dr. Sitki KULUR, Istanbul Technical University

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

Assist. Prof. Dr. Ismail KOC

Dr. Emel Zeray OZTURK

Res. Assist Emir Ali DINSEL

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

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 Devenci, 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	9	Mart	2021	Sayı	2
Volume	9	March	2021	Issue	2

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

FARKLI EĞİLME DONATISINA SAHİP ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETONARME KİRİŞLERDE ÇARPMA ETKİSİ

Impact Effect on Ultra High Performance Fiber Reinforced Beams with Different Flexural Reinforcement

Gamze DEMİRTAŞ, Naci ÇAĞLAR, Yusuf SÜMER280-291

TEPKİ YÜZEYİ YAKLAŞIMI UYGULANARAK KAUÇUK ÜRETİMİNDE MAKİNE-SÜREÇ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Optimization of Machine-Process Parameters with Response Surface Approach in Rubber Production

Aysun SAĞBAŞ, Nejla DİKMEN ÖZKAN292-305

GEODETIC ERRORS ARISING FROM THE DIFFERENCES BETWEEN SK-42 AND WGS-84 COORDINATE SYSTEMS WHEN IMPLEMENTED IN MODERN WEAPONS SYSTEMS

Modern Silah Sistemlerinde Uygulandığında SK-42 ve WGS-84 Koordinat Sistemleri Arasındaki Farklılıklardan Kaynaklanan Hatalar

İlgar MUSAYEV, Magsad GOJAMANOV(English) 306-313

GÜNEŞ ENERJİSİ KOLEKTÖRÜ ÜRETİMİNDE KAYNAK BAĞIMLI GÖREV SÜRELERİ İLE PARALEL MONTAJ HATTI DENGEME

Parallel Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times in Manufacturing of Solar Energy Collector

Yakup ATASAGUN, Yakup KARA314-326

BETONARME SONLU ELEMAN ANALİZİNDE ALTERNATİF BİR KOHEZİF ÇATLAK MODELİ

An Alternative Cohesive Crack Model for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete

Efe SELMAN327-342

**SHAKING TABLE EXPERIMENTS ON MASONRY BUILDING PROTOTYPES
PRODUCED WITH DIFFERENT BOND**

Farklı Duvar Örgüleri ile Üretilmiş Prototip Yığma Binaların Sarsma Tablası Deneyleri

Fatih BAHADIR, Fatih Süleyman BALIK(English) 343-358

**YENİ TİP KORONAVİRÜS COVID-19 SALGINININ PETROL VE DOĞAL GAZ
SONDAJ SEKTÖRÜNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Assessment of the Impact of the New Type of Coronavirus Covid-19 Outbreak on the Oil and Gas Drilling Industry

Mustafa Hakan ÖZYURTKAN359-367

**MADEN İŞLETMELERİNDE COVID 19 SALGININA KARŞI MÜCADELE VE
ALINACAK TEDBİRLER**

Struggle Against the Covid 19 Epidemic and Measures to be Taken in Mining Enterprises

Bilgehan KEKEÇ, Niyazi BİLİM368-376

**HAVA LİDARI VERİLERİNE UYGULANAN FARKLI ENTERPOLASYON
YÖNTEMLERİNİN SAM DOĞRULUĞUNA ETKİSİ**

The Effect of Various Interpolation Methods Applied at Aerial Lidar Data on DTM Accuracy

Duygu ARIKAN, Ferruh YILDIZ, Hasan Bilgehan MAKİNECİ377-394

**AÇIK KAYNAK MEDİKAL YARDIMCI ROBOT KOLUN PYTHON İLE İLERİ
KİNEMATİK ANALİZİ**

Forward Kinematic Analysis of Open Source Medical Assistant Robot Arm with Python

Mehmet GÜL395-402

**GRAFEN NANO PLAKALARLA TAKVİYE EDİLMİŞ Al-5,5Cu-0,5Mn MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Powder Metallurgical Fabrication and Characterization of Graphene Nano Platelets Reinforced Al-5.5Cu-0.5Mn Matrix Composites

Nazlı AKÇAMLI403-415

**PROPERTIES OF MORTARS PRODUCED WITH CLASSLESS AFSIN-ELBİSTAN
FLY ASH AND WASTE GROUND GLASS**

Sınıfsız Afsin-Elbistan Uçucu Külü ve Atık Cam Tozundan Yapılan Harçların Özellikleri

Hanifi BİNİCİ, Mustafa EKEN, Kenan USLU(English) 416-427

**TEK FREKANSLI GNSS ALICILARINDA KULLANILAN İYONOSFERİK ETKİ
DÜZELTME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Comparison of Ionospheric Correction Models Applied In Single Frequency GNSS Receivers

Muzaffer KAHVECİ, Damla ALİOĞLU, Güray ÇETİN428-441

**BAZI FENOLİK KİRLİLİKLERİN İMİDAZOL TÜREVLİ KALİKS[4]AREN
İÇEREN MANYETİK NANOPARTİKÜLLER KULLANARAK SULU
ÇÖZELTİLERDEN UZAKLAŞTIRILMASI**

Removal of Some Phenolic Pollutions from Aqueous Solutions by Magnetic Nanoparticles Containing Imidazole-Derivatized Calix[4]arene

Ezgi AKCEYLAN, Serkan ERDEMİR, Egemen ÖZÇELİK, Begüm TABAKCI.442-454

**EXTREMUM SEEKING BASED FAULT ESTIMATION FOR OUTPUT FEEDBACK
CONTROL OF FLEXIBLE-JOINT ROBOT MANIPULATOR**

Ekstremum Arama Temelli Hata Tahmini ile Esnek Bağlantılı Robot Kolunun Çıkış Geri Besleme Kontrolü

Selami BEYHAN(English) 455-466

**SU KAYIP YÖNETİMİNDE İZOLE BÖLGE TASARIMI VE AKTİF KAÇAK
KONTROLÜNÜN EKONOMİK ANALİZLERİ İÇİN HESAPLAMA ARACININ
GELİŞTİRİLMESİ**

Development of Calculation Tools for Economic Analysis Active Leakage Control and District Metered Area Methods Applied in Water Loss Management

Salih YILMAZ, Mahmut FIRAT, Özgür ÖZDEMİR, Abdullah ATEŞ467-478

**BIOMARKER CANDIDATES IDENTIFIED IN BEHCET'S DISEASE USING
INTEGRATIVE ANALYSIS**

Bütünleştirici Analiz Kullanarak Behçet Hastalığında Biyobelirteç Adayları Belirlenmesi

Tuba SEVİMOĞLU(English) 479-489

**BOZDAĞLAR MASİFİ'NDEKİ (KONYA, ORTA ANADOLU) KIVRIMLARIN
GEOMETRİK SINIFLAMASI**

Geometrical Classification of Folds in the Bozdağlar Massif (Konya, Central Anatolia)

Melikan AKBAŞ, Yaşar EREN490-506

**BETONARME BİR BİNANIN EŞDEĞER DEPREM YÜKÜ YÖNTEMİ İLE
DBYBHY 2007 VE TBDY 2018 YÖNETMELİKLERİNE GÖRE ANALİZİ**

An Analysis According to Regulation of DBYBHY 2007 and TBDY 2018 By Equivalent Earthquake Load Method of A Reinforced Concrete Building

Mahmud Sami DÖNDÜREN, Şeyda HAVA, Ali Serdar ECEMİŞ507-521

**DERİN SİNİR AĞLARI VE YENİDEN ÖRNEKLEME METOTLARI İLE RUTİN
KAN TESTLERİNE DAYALI COVID-19 TESPİTİ**

Covid-19 Detection Based on Routine Blood Tests with Deep Neural Networks and Resampling Methods

Mahmut TOKMAK, Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE522-534



FARKLI EĞİLME DONATISINA SAHİP ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETONARME KİRİŞLERDE ÇARPMA ETKİSİ

¹Gamze DEMİRTAŞ , ²Naci ÇAĞLAR , ³Yusuf SÜMER 

^{1,2} Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

³ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

¹demirtas@sakarya.edu.tr, ²caglar@sakarya.edu.tr, ³ysumer@subu.edu.tr

(Geliş/Received: 31.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.12.2020)

ÖZ: Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) karakteristik basınç dayanımı 150-250 MPa ve çekme dayanımı 10-15 MPa civarlarında olan çelik, sentetik, vb. lifler ile güçlendirilmiş kompozit bir yapı malzemesidir. UYPLB birçok yapı elemanında, geleneksel betonlara göre çeşitli avantajlar sağlama potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışları nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında çarpma yükü altında UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin nümerik olarak analizine imkân sağlayan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrulanması literatürden seçilen deneysel çalışma sonuçları ile yapılmış ve modelin UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışını başarıyla simüle edebildiği gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar çarpma hızı ve donatı oranının UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı lifli betonarme kiriş, Doğrusal olmayan analiz, Çarpma yükü, ABAQUS

Impact Effect on Ultra High Performance Fiber Reinforced Beams with Different Flexural Reinforcement

ABSTRACT: Ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) is a composite structural material with fibers such as steel, synthetic, with a characteristic compressive strength 150-250 MPa and tensile strength around 10-15 MPa. UHPFRC has the potential to provide various advantages over conventional concrete in many structural elements. In this study, the response of reinforced concrete beams produced with UHPFRC subjected to impact load was analyzed numerically. In the first stage of the study, a nonlinear finite element model was developed to simulate the behavior of UHPFRC reinforced concrete beams under impact load. The verification of the developed finite element model was made with the experimental results selected from the literature and it was shown that the model is highly successful to capture the behavior of UHPFRC reinforced concrete beams under impact loads. In the second phase of the study, a parametric study performed by using the validated finite element model and the results exposed that the impact velocity and the reinforcement ratio have an important effect on the response of UHPFRC beams.

Key Words: Ultra-high performance fiber reinforced concrete beam, Nonlinear analysis, Impact load, ABAQUS

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yüksek binalara ve büyük açıklıklı yapı türlerine olan gereksinimlerin artması, yüksek dayanımlı betonlara olan talebi de arttırmaktadır. Bu betonlara çelik, sentetik, vb. lifler katılarak basınç, çekme ve eğilme davranışları oldukça sünek bir hale getirilmektedir. Yeni bir kompozit yapı malzemesi olarak ortaya çıkan Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB); çelik, sentetik, vb. lifler ile güçlendirilmiş, yüksek süneklik, yorulma direnci ve kırılma tokluğuna sahip, karakteristik basınç dayanımı 150-250 MPa ve çekme dayanımı 10-15 MPa civarlarında olan kompozit bir malzemedir (Fujikake ve diğ., 2006; Wille ve diğ., 2011; AFGC, 2013; Demirtaş ve diğ., 2018). Bu üstün özellikler düşük su/çimento oranı (yaklaşık %2), dane yoğunluğunu maksimize eden ve homojenlik sağlayan çok ince katkı malzemeleri, buhar kürü ve mikro çelik liflerin katkısı ile sağlanmaktadır (Yoo ve Banthia, 2017). UYPLB'nin bu özellikleri sayesinde ani ya da tekrarlı yüklemelere karşı oldukça yüksek dayanıma sahip olması dolayısıyla, nükleer enerji santralleri, askeri yapılar, ulaşım altyapısı, kıyı yapıları gibi dinamik yüklemelere maruz kalabilecek betonarme yapılar için uygun bir malzeme olabilmektedir (Fujikake ve diğ., 2006; Demirtaş, 2019). Fakat UYPLB ile üretilen betonarme elemanların dinamik davranışının incelenmesi ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

UYPLB ile üretilen kirişin dinamik davranışını deneysel olarak inceleyen Fujikake ve diğ. (2006) çalışmalarında, etriye donatısı olmayan kirişte eğilme kırılması gerçekleştiğini raporlamıştır. Othman ve Marzouk (2016); beton tipi, lif içeriği ve donatı oranının UYPLB ile üretilen döşemelerin dinamik davranışına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Lif içeriğinin ve donatı oranının artması ile aynı dinamik yük altında daha az kalıcı deplasman oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yoo ve diğ. (2015), dinamik yükleme altındaki UYPLB ile üretilen kirişlerin eğilme davranışında donatı oranının etkisini incelemiştir. Donatı oranı arttıkça daha az kalıcı deplasman oluştuğunu ve maksimum çatlak genişliğinin azaldığını tespit etmişlerdir. Yoo ve diğ. (2017), dinamik yükleme altındaki UYPLB ile üretilen kirişlerde hacimce %2 oranında çelik lif kullanılması durumunda hasar seviyesinin azaldığı ve dolayısıyla kalıcı ve maksimum deplasman değerlerinde ciddi oranlara düşmeler oluştuğunu rapor etmişlerdir.

UYPLB, birçok yapı elemanında, özellikle kirişlerde geleneksel betonlara göre çeşitli avantajlar sağlama potansiyeline sahiptir. Bu tür yapı elemanlarının tasarım prosedürünün çok iyi bilinmemesi ve deneysel çalışma için kullanılacak test ekipmanı ve malzemenin yüksek maliyetli olması gibi nedenlerden dolayı UYPLB ile üretilen yapı elemanlarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelendiği çalışmaların literatürde sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hızla gelişen bilgisayar teknolojileri bu tür deneylerin bilgisayar ortamında yapılabilmesine, oluşturulan deney matrislerinin 2 veya 3 boyutlu modellerle hızlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân sağlamaktadır (Demirtaş, 2019; Demirtaş ve diğ., 2018; Chen ve Graybeal, 2012; Sümer, 2010; Birtel ve Mark, 2006). Ancak oluşturulan sayısal modellerin eleman davranışını gerçekçi bir şekilde yansıtabildiği mutlaka kanıtlanmalıdır.

Bu çalışmanın amacı, UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışlarını incelemektir. Bu amaçla, literatürden seçilen deneysel çalışmadaki betonarme kirişlerin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, nümerik modelin oluşturulması için gerekli modelleme parametreleri açıklanmış ve kirişlerin çarpma yükü etkisi altındaki doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesinde ABAQUS (Abaqus, 2018) sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrulanması deneysel çalışma sonuçları ile yapılmış ve modelin UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışını başarıyla simüle edebildiği gösterilmiştir. Doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar grafikler ve çizelgeler halinde sunularak değerlendirilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMA VERİLERİ (EXPERIMENTAL STUDY DATA)

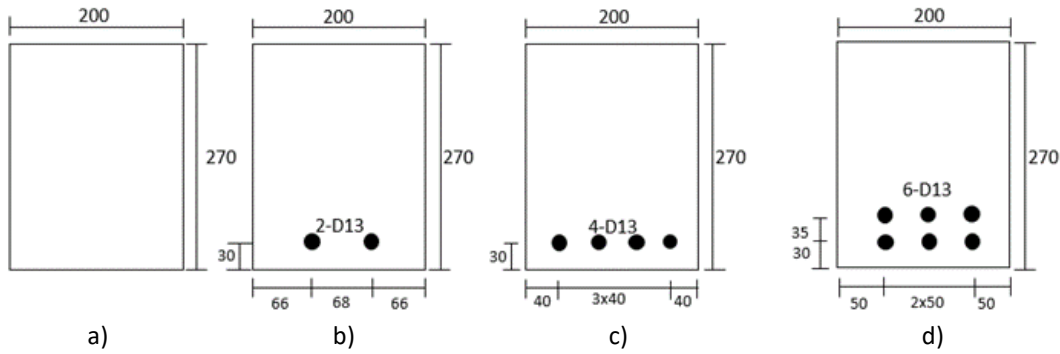
Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrulanması için literatürden seçilen deneysel çalışma (Yoo ve diğ., 2015) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerde donatı oranının, eğilme davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 4 farklı donatı oranına sahip kiriş üzerinde

çarpma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 2900 mm uzunluğunda, 200x270 mm dikdörtgen enkesit boyutlarına sahiptir (Şekil 1). Kullanılan boyuna donatı (D13) 12.7 mm çapında olup, numunelerde donatı oranı sırasıyla %0.00, % 0.53, %1.06 ve %1.71 olarak tasarlanmıştır (Şekil 1). Deneyler tüm numunelere 1.60 m yükseklikten 270 kg ağırlığında kütlelerin serbest düşürülmesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).

Çizelge 1. Yükleme hızı dikkate alınarak elde edilen malzeme dayanımları (Yoo ve diğ., 2015)

Table 1. Material strengths obtained considering the strain rate (Yoo et al., 2015)

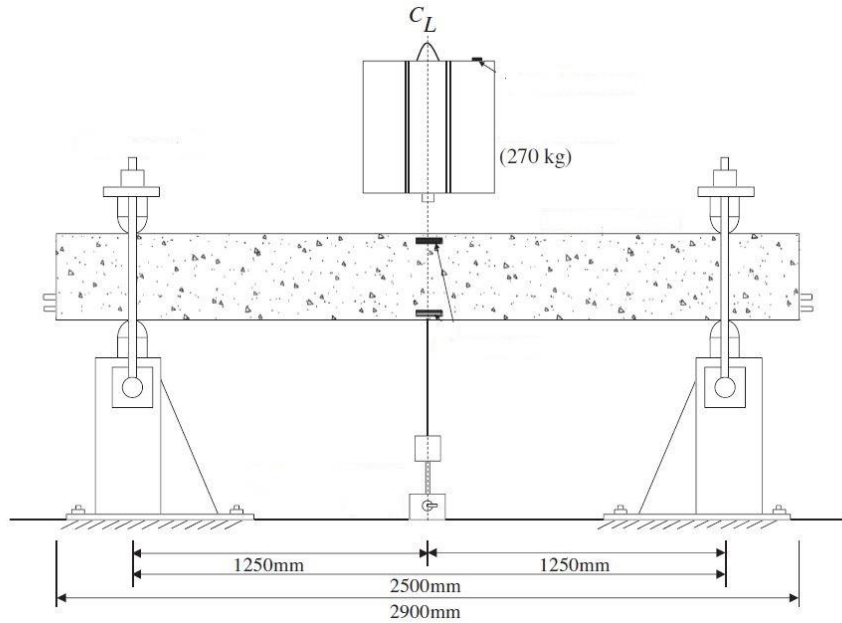
İsim	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Beton Çekme Dayanımı (MPa)	Donatı Akma Dayanımı (MPa)
UH-N	198.9	17.6	-
UH-0.53%	197.8	17.7	630.2
UH-1.06%	201.3	17.8	635.2
UH-1.71%	199.1	16.3	629.4



Şekil 1.

Şekil 1. Kesit detayı a) UH-N b) UH-0.53% c) UH-1.06% d) UH-1.71% (Yoo ve diğ., 2015)

Figure 1. Section detail a) UH-N b) UH-0.53% c) UH-1.06% d) UH-1.71% (Yoo et al., 2015)



Şekil 2. Çarpma deney düzeneği (Yoo ve diğ., 2015)

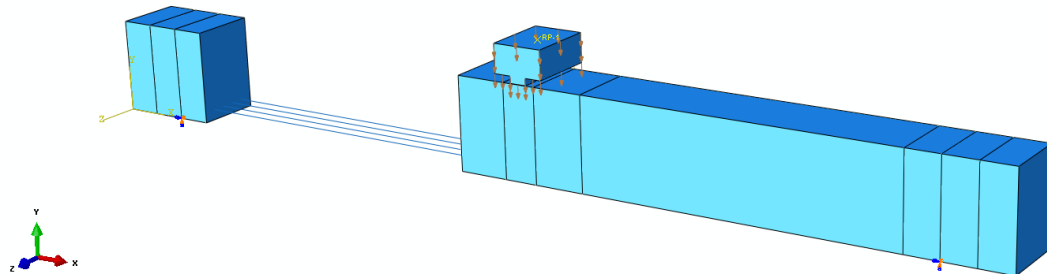
Figure 2. Impact test setup (Yoo et al., 2015)

Deney numunelerinde kullanılan beton malzemesinin statik yükleme etkisi altındaki basınç dayanımı (f_c) 152.5 MPa, elastisite modülü (E) 44 GPa olarak verilmiştir. Dinamik yükleme etkisi altında, yükleme hızına bağlı olarak beton dayanımının arttığı bilinmektedir. Dinamik yüklemelerde oluşan şekil değiştirme hızı (strain rate) etkisi dikkate alınarak hesaplanan beton ve donatı mekanik özellikleri Çizelge 1’de verilmiş ve modelleme için çizelgedeki değerler kullanılmıştır.

SONLU ELEMEN MODELİ VE PARAMETRELER (FINITE ELEMENT MODEL AND PARAMETERS)

Darbe etkisi altındaki deneysel analizleri yapılan numunelerin nümerik analizleri ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak yapılmıştır. Doğrusal olmayan dinamik analizler için ABAQUS programında açık (explicit) ya da kapalı (implicit) direk integrasyon yöntemleri kullanılabilir. Açık dinamik analiz yöntemi, çarpma etkisi gibi kısa süreli problemlerin çözümünde daha hızlı ve daha verimli sonuçlar verdiği için bu çalışma kapsamında kullanılmıştır (Abaqus, 2018).

Deney sonuçlarının elde edilmesinde sonlu eleman sınır koşullarının doğru tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda mesnetler deneyde verilen konumlarda ilgili düğüm noktalarına tanımlanmıştır. Deney verilerine göre bu düğüm noktalarının X yönündeki hareketleri ve Z yönündeki dönmeleri serbest bırakılmıştır. Çelik çarpma ağırlığı rijit cisim (rigid body) özelliği kullanılarak modellenmiş ve cismin orta noktasında belirlenen referans noktasına kütlesi ile tanımlanmıştır. Çarpma kütlelerinin hareketi, sadece kirişin düzlemine dik doğrultuda hareket edebilecek şekilde sınırlandırılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen çarpma anındaki hız (5.60 m/s) kütleyle atanmış ve analiz öncesi kütle kiriş yüzeyine çok yakın bir şekilde konumlandırılmıştır. Çarpma ağırlığı ve kiriş arasındaki çarpma teması “general contact interaction” özelliği kullanılarak tanımlanmıştır. Kontak etkileşimi için “hard contact” özelliği ile yüzeylerin birbiri ile tam etkileşimi sağlanmıştır (Şekil 3).



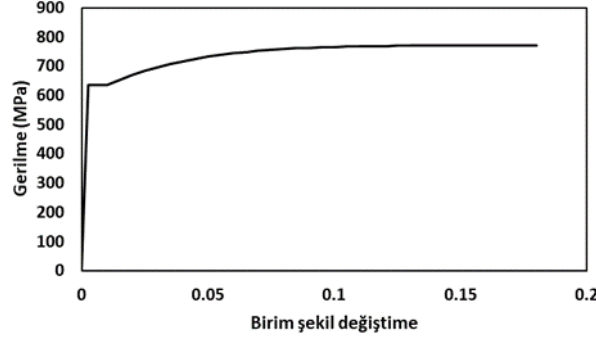
Şekil 3. Sonlu eleman modeli (UH-1.06%)

Figure 3. Finite element model (UH-1.06%)

Beton kesitlerin modellenmesinde ABAQUS sonlu eleman kütüphanesinde bulunan 3 boyutlu, 8-düğüm noktalı ve azaltılmış integrasyon özelliğine sahip C3D8R elemanı seçilmiştir. Donatı çubuklarının modellenmesinde ise 3 boyutlu analizler için uygun olan aksel doğrultuda tek serbestlik dereceli, 2-düğüm noktalı, lineer doğrusal T3D2 sonlu elemanı kullanılmıştır. Donatı ve beton elemanlar arasında etkileşim kesitler arasında ortak serbestlik derecesi ile hareketi sağlayan gömülü (embedded) özelliği ile tanımlanmıştır.

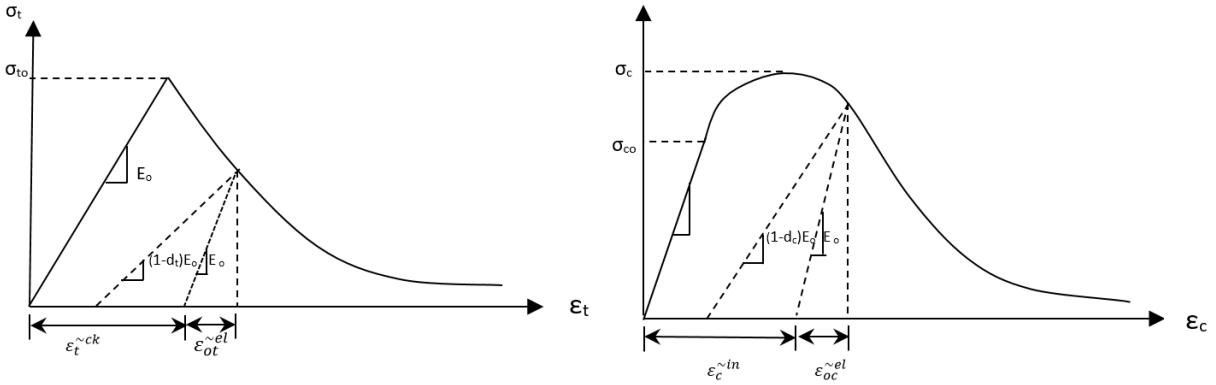
Donatının doğrusal olmayan davranışını modellemek için gerekli parametreler literatürden seçilen deneysel çalışmadan elde edilmiş olup, bu değerler kullanılarak donatı malzeme modeli oluşturulmuştur. Numunelerdeki donatı mekanik değerleri birbirlerine çok yakın olduğu için, sadece UH-1.06% numunesi için oluşturulan donatı modeli Şekil 4’de verilmiştir (Çizelge 1). Betonun doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için ABAQUS sonlu eleman programında var olan ve plastisite kuramlarına dayanan Beton Hasar Plastisite (BHP) modeli kullanılmıştır. BHP modeli öncelikli olarak, çevrimsel veya dinamik yükleme altında beton yapıların analizi için kullanılmaktadır [9]. Ultra yüksek dayanımlı beton malzeme modelini tanımlamak için gerekli iki temel yenilme mekanizması; basınç kırılması ve çekme çatlamasıdır. (Şekil 3). Şekil 3’ten de görüldüğü gibi BHP modelinin tek eksenli çekme altındaki davranışı maksimum

çekme gerilmesi değerine ulaşana kadar lineer elastik gerilme şekil değiştirme ilişkisi ile tanımlanır. Bu gerilme değerine ulaşan betonda çekme çatlakları oluşur. Çatlakların ilerlemesi ile dayanım azalmaya başladığı kısım çekme rijitliği olarak tanımlanır (Şekil 5a). Çekme gerilmesindeki bu azalma, gerilme şekil değiştirme ilişkisi ile veya kırılma(çatlama) enerjisi ile tanımlanabilmektedir (Earij ve diğ., 2017).



Şekil 4. Donatı mekanik davranışı (UH-1.06%)

Figure 4. Rebar mechanical behavior (UH-1.06%)



Şekil 5. Eksenel çekme (a) ve basınç (b) altında betonun davranışı (ABAQUS Kullanıcı Dökümanı)

Figure 5. Concrete behavior under axial tension (a) and pressure (b) (ABAQUS Analysis User's Manual)

Tek eksenli basınç yüklemesi altında, BHP modeli σ_{c0} değerine kadar lineer bir davranış sergilemektedir. Bu dayanım aşıldıktan sonra betonda plastik şekil değiştirmeler başlamaktadır. σ_{c0} ile σ_{cu} arasındaki davranış dayanım pekleşmesi, σ_{cu} aşıldıktan sonra oluşan davranış ise dayanım yumuşaması olarak ifade edilmektedir.

d_c ve d_t sırası ile betonun basınç ve çekme etkisi altındaki elastik rijitlikteki azalmayı ifade eden hasar parametreleri olup denklem 1 ve 2 ile ifade edilmektedir (Birtel ve Mark, 2006). Hasar parametreleri 0 ile 1 arasında değişen değerler almaktadır. 0 hasarsız durumu, 1 tam hasarlı durumu ifade etmektedir.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c/E_0}{\sigma_c/E_0 + \varepsilon_c^{ln}(1-b_c)} \quad (1)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_{t0}/E_0}{\sigma_{t0}/E_0 + \varepsilon_t^{ck}(1-b_t)} \quad (2)$$

Bu modelde güç tükenme zarfını belirlemek için 4 temel parametre gereklidir. Bu değerlerden Eksantriste parametresi (ϵ), varsayılan değer olarak 0.1 kabul edilmiştir. İki eksenli başlangıç basınç akma gerilmesinin tek eksenli başlangıç basınç gerilmesine oranı (σ_{b0}/σ_{c0}) için tipik değerler 1.10 ile 1.16 arasında

değişmektedir (Lubliner ve diğ., 1989). UYPLB için bu değer 1.05 olarak tavsiye edilmiştir (Curbach ve Speck, 2008). K_c değeri nümerik analizlerde varsayılan değer olarak verilen 2/3 kabul edilmiştir. Dilasyon açısı (ψ) ise, hassasiyet analizi yapılarak belirlenmiştir.

Betonun basınç altında gerilme-şekil değiştirme davranışı deney sonuçlarına dayanarak normal ve yüksek dayanımlı betonlar için ampirik denklemlerle tanımlanmıştır (Lu ve Zhao, 2010). Bu çalışma kapsamında UYPLB'nin basınç davranışının modellenmesinde kullanılan malzeme modeli ilk olarak Lu ve Zhao tarafından önerilmiş daha sonra Singh ve diğ. (2017) tarafından ampirik denklemi tekrar düzenlenerek UYPLB'nin gerilme-şekil değiştirme davranışını tek eksenli basınç altında tanımlamıştır. Singh tarafından önerilen formül tam ölçekli kirişin sonlu eleman analizi yönteminde kullanılmış ve dinamik analiz için geçerliliği araştırılmıştır. Basınç davranışı için gerekli formüller denklem 3-8 ile tanımlanmıştır.

$$\sigma_c = f'_c \left[\frac{(E_0/E_{sc})(\epsilon/\epsilon_0) - (\epsilon/\epsilon_0)^2}{1 + (E_0/E_{sc} - 2)(\epsilon/\epsilon_0)} \right] \quad (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0) \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{f'_c}{1 + 1/4 \{ [(\epsilon/\epsilon_0) - 1] / [(\epsilon_L/\epsilon_0) - 1] \}^{1.5}} \quad (\epsilon_0 \leq \epsilon) \quad (4)$$

$$\epsilon_L = \epsilon_0 \left[\left(\frac{1.25 E_0}{10 E_{sc}} + \frac{4}{5} \right) + \sqrt{\left(\frac{1.25 E_0}{10 E_{sc}} + \frac{4}{5} \right)^2 - \frac{4}{5}} \right] \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = 750 (f'_c)^{0.35} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$E_0 = 15050 (f'_c/10)^{1/3} \quad (7)$$

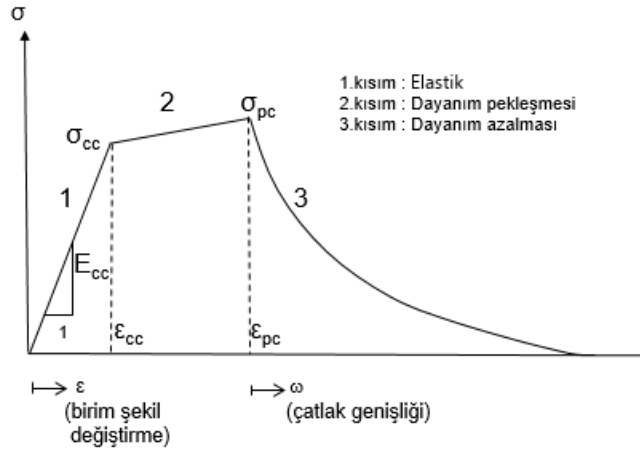
$$E_{sc} = f'_c / \epsilon_0 \quad (8)$$

Burada f'_c betonun tek eksenli basınç dayanımını, ϵ_0 f'_c değerine karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi, E_0 başlangıç elastik modülünü, E_{sc} f'_c değerine karşılık gelen sekant modülünü ifade etmektedir.

Çekme altındaki davranışı UYPLB için normal dayanımlı betonun davranışından farklıdır. Normal betonda kırılma sonrası yük azalma hızı çok yüksek ve deformasyon çok düşük olmasına karşın, lifli betonda çatlama sonrası yükün daha da arttığı görülür. UYPL betonda lifler köprü görevi görerek betonda oluşan mikro çatlakların büyümesini engelleyip beton matrisi üzerinden boşalan gerilmeyi karşılar ve lokal çatlak oluşana kadar bir miktar daha gerilme almasını sağlar. Gerilme transferi sebebiyle, çatlağın yayılması için gerekli olan enerji miktarı da normal betona göre çok daha fazladır (Redaelli ve Muttoni, 2007). İdealleştirilmiş model yaklaşımı çekme davranışını elastik bölge, dayanım pekleşmesi ve dayanım azalması olmak üzere 3 kısma ayırmaktadır (Şekil 6) (Wille ve diğ., 2011).

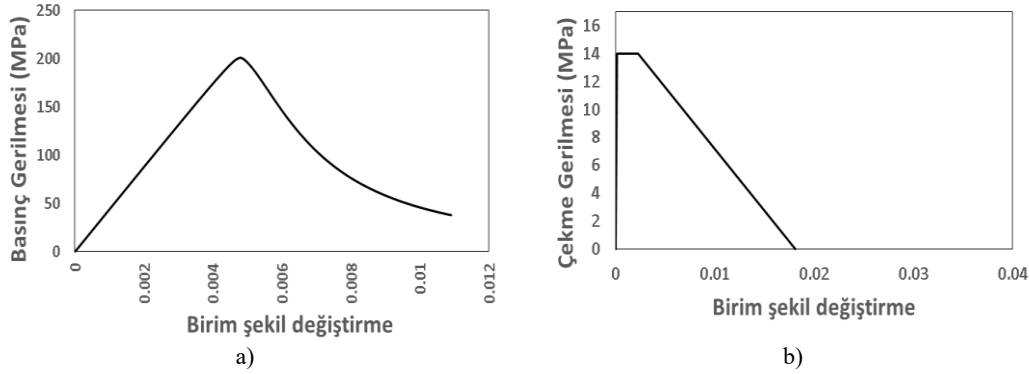
Çekme davranışının tanımlanmasında elastik kısımda çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme ilişkisi çatlama dayanımının (σ_{cc}) %90-95'ine kadar lineer olarak ilerler. Dayanım pekleşmesi bölgesinde çekme dayanımına (σ_{pc}) ulaşana kadar mikro çatlaklar ve inelastik şekil değişimleri meydana gelir. Dayanım yumuşaması kısmında ise lokal çatlaklar oluşur ve dayanım azalmaya başlar.

Bu çalışmada referans alınan deneysel çalışmada, betonun çekme davranışını elde etmek için laboratuvar ortamında eğilme testi uygulanmış, daha sonra geri analiz metodu ile çekme gerilmesi-çatlak genişliği grafiği elde edilmiştir. Deneysel çalışmadan edilen çekme gerilmesi- çatlak genişliği eğrisi Fransa İnşaat Mühendisliği Topluluğu (AFGC) tarafından önerilen ampirik bağıntılar kullanılarak gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine dönüştürülebilmektedir. (Şekil 7b).



Şekil 6. UYPLB için idealleştirilmiş çekme davranışı (Wille ve diğ., 2011)

Figure 6. Idealized tension behavior for UHPFRC (Wille et al., 2011)



Şekil 7. Beton basınç (a) ve çekme (b) davranışı (UH-1.06%)

Figure 7. Concrete compressive (a) and tensile (b) behavior (UH-1.06%)

$$\varepsilon_{0.3} = \frac{w_{0.3}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{1\%} = \frac{w_{1\%}}{l_c} + \frac{f_{tj}}{\gamma_{bf} E_c} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{lim} = \frac{l_f}{4l_c} \quad (11)$$

Bu bağıntılarda $\varepsilon_{0.3}$, çatlak genişliğinin 0.3 mm olduğu birim şekil değiştirmeyi ($w_{0.3}$), $\varepsilon_{1\%}$, kiriş yüksekliğinin %1'i kadar çatlak genişliğinin ($w_{1\%}$) olduğu birim şekil değiştirmeyi ifade etmektedir. l_c lif uzunluğunu, γ_{bf} kısmi güvenlik faktörünü, E_c beton elastisite modülünü göstermektedir. l_c ise karakteristik uzunluktur ve kiriş yüksekliğinin 2/3'ü olarak ifade edilmektedir. Deneysel verilerden elde edilen parametreler kullanılarak elde edilen beton ve donatı mekanik davranışı, Şekil 7 ve Şekil 4'de, Beton Hasar Plastisite modelini oluşturmak için gerekli parametreler Çizelge 2'de verilmektedir. Çekme davranışının modellenmesinde K katsayısı 1.25 olarak alınmıştır. Nümerik modelin analiz sonuçlarına çözüm ağı sıklığının etkisini belirlemek üzere 50, 25 ve 12.5mm kenar uzunluğuna sahip sonlu elemanlarla oluşturulmuş numuneler üzerinde analizler yapılmış analiz süresi ve sonuçların yakınsaması açısından optimum değer olarak 25 mm mesh yoğunluğu belirlenmiştir.

Geliştirilen sonlu eleman modelinin UYPLB ile üretilen betonarme kirişin davranışını gerçekçi bir şekilde simüle edebilmesi için modele etki eden BHP modeli temel parametrelerinin kesin bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Çizelge 2). Literatürde yapılan sayısal çalışmalarda ε , σ_{bo}/σ_{co} , K_c değerlerinin modelin davranışını belirgin bir şekilde etkilemediği ortaya konulmuştur. Bu çalışmada bu

değerler seçilirken ABAQUS Kullanıcı Dökümanında (User Manuel) önerilen değerler dikkate alınmıştır. Eksenel basınç altında betonda kritik gerilmeye kadar hacimsel değişimler poisson oranıyla belirlenirken kritik gerilme sonrası oluşan plastik hacimsel değişimler dilasyon açısı parametresiyle dikkate alınmaktadır (Sümer, 2010). Sonlu eleman analizlerinde 3 farklı dilasyon açısı değeri ile analiz yapılmış ve 10^0 dilasyon açısının deney verisindeki tepe noktası değerine daha yakın sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte belirlenen dilasyon açısının Othman ve Marzouk (2017) ve Chen ve Graybeal (2012) tarafından önerilen değerlerle de uyumlu olduğu belirlenmiştir.

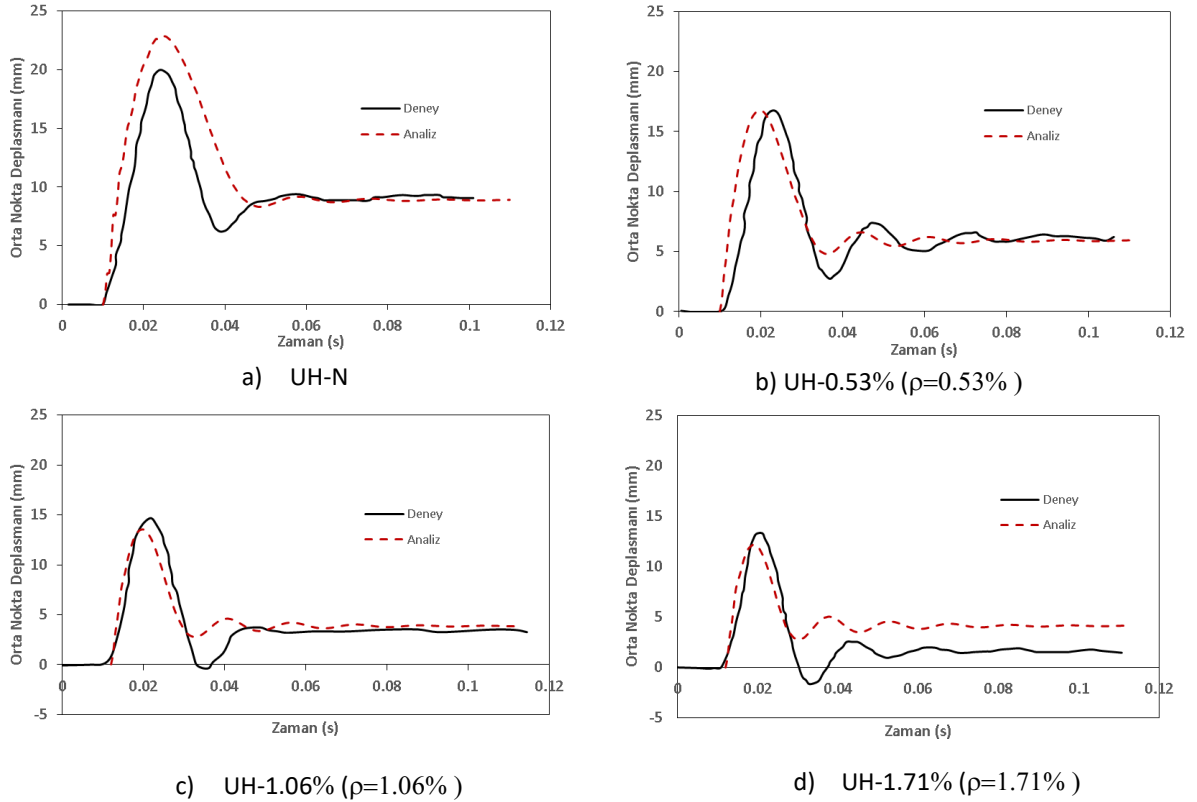
Çizelge 2. BHP modeli temel parametreleri

Table 2. CDP model basis parameters

Parametre	Değer
Dilasyon açısı (ψ)	10
σ_{bo}/σ_{co}	1.05
Eksantriste parametresi (ϵ)	0.1
K_c	2/3
Viskozite parametresi (η)	0.0001

SONLU ELEMEN MODELİNİN DOĞRULANMASI (FINITE ELEMENT MODEL VALIDATION)

Deneyel çalışmalarda çarpma ağırlığının 1.60 m yükseklikten serbest bırakılmasıyla elde edilen sonuçlar ile nümerik model sonuçlarının karşılaştırması Şekil 8'de sunulmuştur. Ayrıca deney ve sayısal modelden elde edilen sonuçlar ve hata oranları Çizelge 3'de özetlenmiştir.



Şekil 8. Deney ve analiz sonuçlarından elde edilen Deplasman-Zaman grafiği

Figure 8. Displacement-Time graph obtained from experiment and analysis results

Şekil 8’deki grafikler ve elde edilen sonuçlar dikkatle incelendiğinde sonlu eleman modeli ile deneysel sonuçların oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin orta noktasında oluşan deformasyonların maksimum değerlerinde hata oranının %8 civarlarında olduğu, donatısız kiriş numunesinde ise bu değer %14 seviyelerine çıktığı gözlemlenmektedir. Kalıcı deformasyonlar açısından ise hata oranının %5’in altında kaldığı ve sadece donatı oranının en yüksek olduğu UH-1.71% kiriş numunesinde hata oranının %186 seviyesine çıktığı görülmektedir. Analizlerin tamamında aynı geliştirilmiş sonlu eleman modelinin kullanıldığı ve BHP modeli temel parametrelerinin sabit tutulduğu dikkate alındığında sonlu eleman modelinin UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri etkisi altındaki davranışını başarıyla simüle ettiği görülmektedir. Dolayısıyla geliştirilen sonlu eleman modeli, çarpma etkisindeki UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin davranışının incelenmesinde güvenle kullanılabilir.

Çizelge 3. Deneysel sonuçları ile sonlu eleman modeli sonuçlarının karşılaştırılması

Table 3. Comparison of experiment results and finite element model results

Numune	Maksimum deformasyon			Kalıcı deformasyon		
	Deney (mm)	Analiz (mm)	Hata	Deney (mm)	Analiz (mm)	Hata
UH-N ($\rho=0.00\%$)	19.98	22.82	0.14	9.07	8.90	0.02
UH-0.53% ($\rho=0.53\%$)	16.75	16.75	0.00	6.21	5.91	0.05
UH-1.06% ($\rho=1.06\%$)	14.67	13.55	0.08	3.27	3.83	0.17
UH-1.71% ($\rho=1.71\%$)	13.32	12.22	0.08	1.45	4.15	1.86

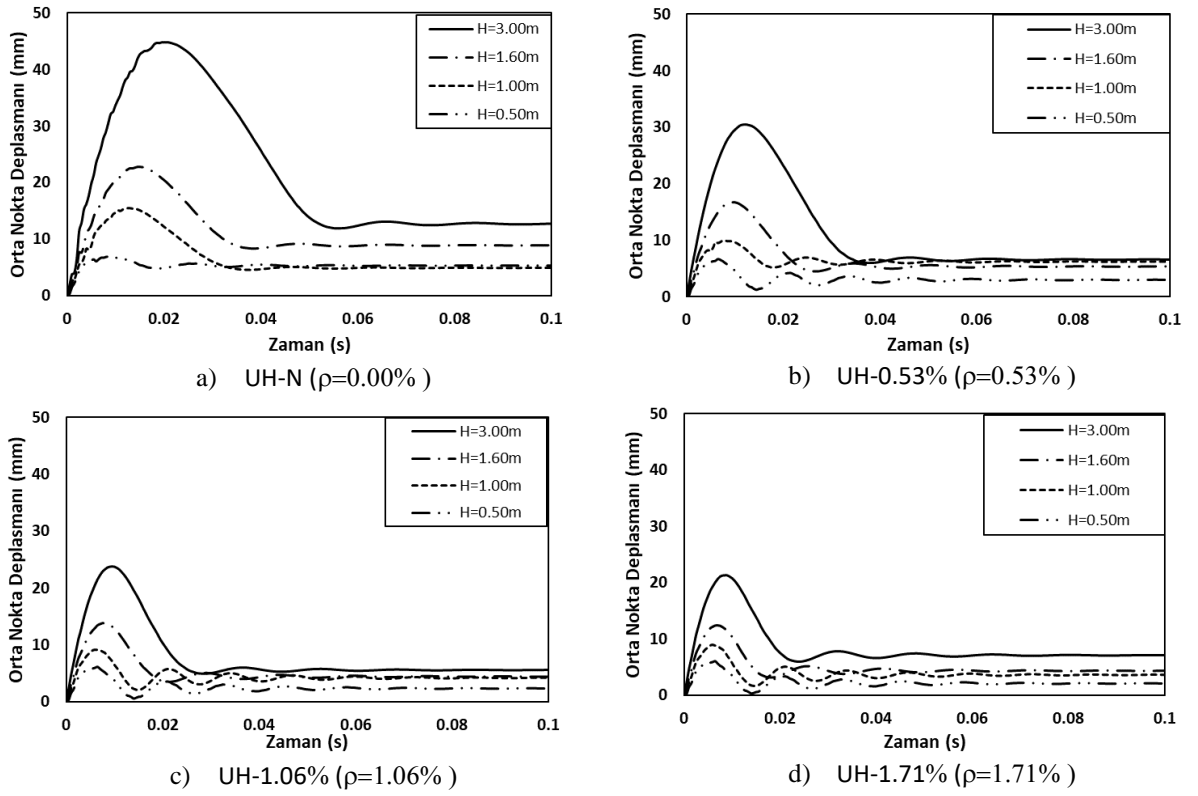
PARAMETRİK ÇALIŞMA (PARAMETRIC STUDY)

Doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak parametrik bir çalışma yapılmış ve UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma etkisi altındaki davranışı sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan parametrik çalışmada UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma davranışına donatı oranının ve çarpma hızının (düşme yüksekliği) etkisi araştırılmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4. Parametrik Çalışma Detayları

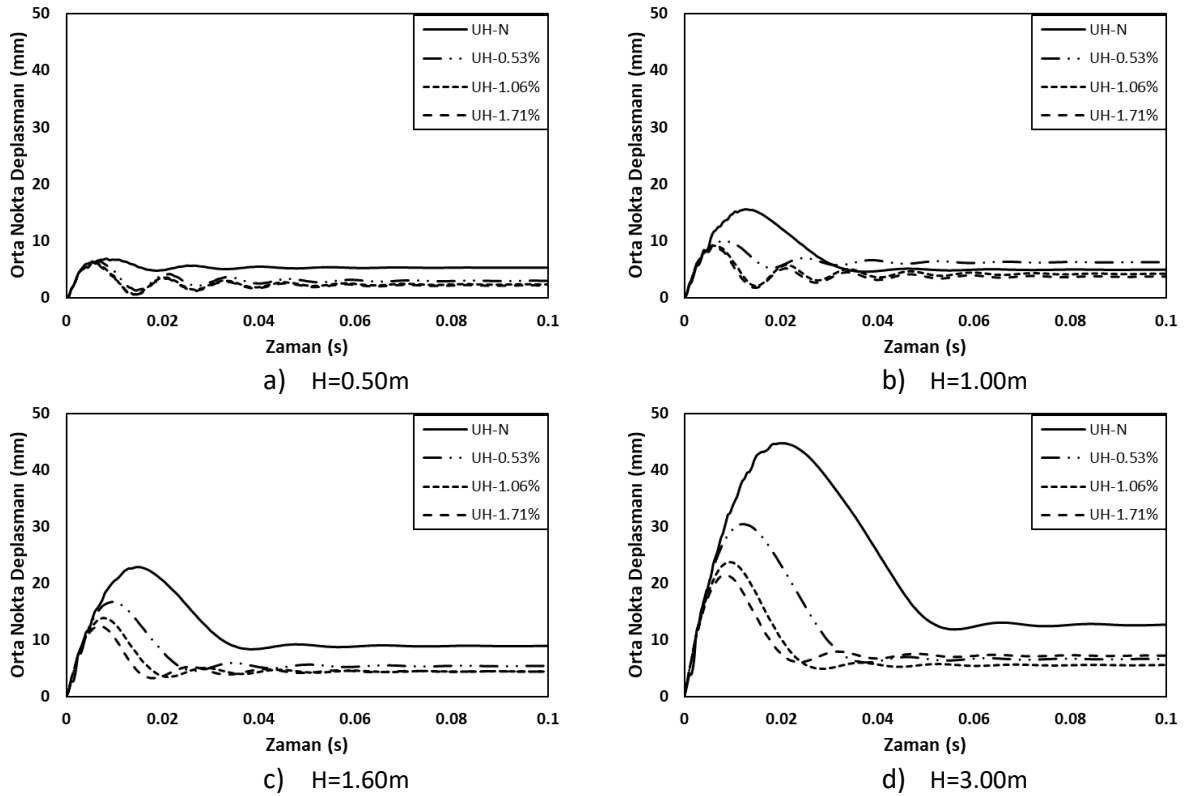
Table 4. Parametric Study Details

	h (m)	V (m/s)	
UH-N ($\rho=0.00\%$)	0.50	3.13	Nümerik
	1.00	4.43	Nümerik
	1.60	5.60	Deney
	3.00	7.67	Nümerik
UH-0.53% ($\rho=0.53\%$)	0.50	3.13	Nümerik
	1.00	4.43	Nümerik
	1.60	5.60	Deney
	3.00	7.67	Nümerik
UH-1.06% ($\rho=1.06\%$)	0.50	3.13	Nümerik
	1.00	4.43	Nümerik
	1.60	5.60	Deney
	3.00	7.67	Nümerik
UH-1.71% ($\rho=1.71\%$)	0.50	3.13	Nümerik
	1.00	4.43	Nümerik
	1.60	5.60	Deney
	3.00	7.67	Nümerik



Şekil 9. Çarpma etkisindeki UYPL betonarme kirişlerde deplasman-zaman değişimi

Figure 9. Displacement-time in UHPFRC beams under impact



Şekil 10. Farklı donatı oranındaki UYPL betonarme kirişlerde çarpma hızının etkisi

Figure 10. Effect of impact drop velocity on UHPFRC beams with different reinforcement ratios

Parametrik çalışmada sırasıyla 0.00, 0.53, 1.06 ve 1.71 donatı oranlarına sahip sonlu eleman modellerinin dört farklı çarpma hızı (düşme yüksekliği) için doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin çarpma davranışı kiriş orta noktasının deformasyonunun zamanla değişimi ve kalıcı deformasyonun belirlenmesi üzerinden değerlendirilmiştir.

Şekil 9'dan da görüldüğü gibi, aynı donatı oranına sahip betonarme kirişlerde çarpma hızı (düşme yüksekliği) değişiminin; maksimum yerdeğiştirme ve kalıcı yerdeğiştirme üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Çarpma hızının artması ile maksimum yerdeğiştirme ve kalıcı yerdeğiştirme değerlerinde artış gözlemlenmekle birlikte donatı oranı artması durumunda ise bu değerlerde azalmalar oluşmaktadır.

Şekil 10 dikkatle incelendiğinde, aynı çarpma hız değerinde, donatı oranı arttıkça maksimum deplasman değerlerinin azaldığı ve numunenin maksimum deplasman değerine ulaşana kadar geçen sürenin de kısaldığı görülmüştür. Kalıcı yerdeğiştirme değerlerinin donatı oranı artarken azaldığı buna karşılık ise çarpma hızı artarken arttığı gözlemlenmiştir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, çarpma yükü altında ultra yüksek performanslı lifli betonarme kirişlerin nümerik olarak analizine imkân sağlayan bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen sonlu eleman modelinin doğrusal olmayan analizlerinden elde edilen sonuçlar, deney sonuçları ile oldukça iyi bir uyum içerisindedir. UYPLB için seçilen malzeme modeli ve bu malzeme modeli değerleri ile tanımlanan BHP modelinin bu kirişlerin nümerik analizleri için elverişli olduğu, önerilen beton basınç ve çekme eğrilerinin dinamik analizlerde yüksek dayanımlı ve lif katkılı betonların davranışını modellemede kullanılabilir olduğu analiz sonuçlarıyla açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca önerilen model mevcut kirişlerin yenilme mekanizmalarını da doğru bir şekilde tahmin etmektedir. Dolayısıyla UYPLB ile üretilen betonarme kirişlerin çarpma yükleri altındaki davranışı ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekçi bir şekilde simüle edilebileceği görülmektedir.

Parametrik çalışma sonuçları incelendiğinde boyuna donatı oranının azalması ile maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerde belirgin artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Betonarme kirişlerin deforme olmasında en etkili parametrenin çarpma hızının değişimi olduğu belirlenmiştir. Çarpma hızları açısından değerlendirildiğinde ise, hız artması ile kiriş ortasındaki maksimum ve kalıcı yerdeğiştirmelerde artışlar oluşmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ABAQUS Documentation, 2018, Dassault Systèmes, 10 rue Marcel Dassault CS 40501 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex, SE, France.
- AFGC (Association Francaise du Genil Civil) 2013, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes Recommendations, Fransa.
- Birtel, V., Mark, P., 2006, "Parameterised finite element modelling of RC beam shear failure", In ABAQUS users' conference, ss. 95-108.
- Chen, L., Graybeal, B. A., 2012, "Modeling Structural Performance of Ultra High Performance Concrete I-Girders", Journal of Bridge Engineering, Cilt 17, Sayı 5, ss. 754-764.
- Curbach, M., Speck, K., 2008, "Ultra high performance concrete under biaxial compression", In Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, Sayı 10, ss. 477-484.
- Demirtaş, G., Çağlar, N., Sümer, Y. (2018). Çarpma Etkisindeki Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Analizi. Academic Perspective Procedia, 1 (1), 1126-1135. DOI: 10.33793/acperpro.01.01.180
- Demirtaş, G., 2019, Çarpma Etkisindeki Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye.

- Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., Zhou, X., 2017, "Nonlinear three-dimensional finite-element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation", *Engineering Failure Analysis*, Sayı:82, ss. 92-115.
- Fujikake, K., Senga, T., Ueda, N., Ohno, T., Katagiri, M., 2006, "Study on impact response of reactive powder concrete beam and its analytical model", *Journal of advanced concrete technology*, Sayı 4(1), ss. 99-108.
- Lu, Z. H., Zhao, Y. G., 2010, "Empirical Stress Strain Model for Unconfined High Strength Concrete under Uniaxial Compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Sayı 22(11), ss. 1181-1186.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., Oñate, E., 1989, "A plastic-damage model for concrete", *International Journal of solids and structures*, Sayı 25(3), ss. 299-326.
- Othman, H., Marzouk, H., 2016, "Impact response of ultra-high-performance reinforced concrete plates", *ACI Structural Journal*, Sayı 113(6), ss. 1325-1334.
- Othman, H., Marzouk, H., 2017, "Finite Element Analysis of UHPFRC Plates under Impact Loads", *AFGC-ACI-fib-RILEM Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC*, ss. 337-346.
- Redaelli, D., Muttoni, A., 2007, "Tensile Behaviour of Reinforced Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Elements", *In fib Symposium, Dubrovnik*, ss. 267-274.
- Singh, M., Sheikh, A. H., Ali, M. M., Visintin, P., Griffith, M. C., 2017, "Experimental and Numerical Study of The Flexural Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete Beams", *Construction and Building Materials*, Sayı 138, ss. 12-25.
- Sümer, Y., 2010, "FRP Elemanlarla Güçlendirilmiş Hasarlı Betonarme Kirişlerin Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi", *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye*
- Wille, K., Kim, D. J., Naaman, A. E., 2011, "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures*", Sayı 44(3), ss. 583-598.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., 2017, "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast", *Construction and building materials*, Sayı 149, ss. 416-431.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Kim, S. W., Yoon, Y. S., 2015, "Response of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams with continuous steel reinforcement subjected to low-velocity impact loading", *Composite Structures*, Sayı 126, ss. 233-245.
- Yoo, D. Y., Banthia, N., Yoon, Y. S., 2017, "Impact Resistance of Reinforced Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers", *ACI Structural Journal*, Sayı 114(1) ss.113-124.



TEPKİ YÜZEYİ YAKLAŞIMI UYGULANARAK KAUÇUK ÜRETİMİNDE MAKİNE-SÜREÇ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

¹Aysun SAĞBAŞ^{ID}, ²Nejla DİKMEN ÖZKAN^{ID}

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ,
TÜRKİYE

¹asagbas@nku.edu.tr, ²nejladikmen@gmail.com

(Geliş/Received: 08.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.12.2020)

ÖZ: Çalışmanın amacı; bir kauçuk üretim işletmesinde istatistiksel deneysel tasarım uygulanarak, kalite hatalarını ve kalite kaynaklı ürün maliyetini minimize eden makine-süreç parametrelerinin optimizasyonunu sağlamaktır. Bu amaçla, enjeksiyon makinesinde üretilen ürünün kalite özellikleri (patlak, yırtık, yanık ve çapak) tepki değişkeni olarak belirlenmiştir. Belirlenen kalite özelliklerine etkisi olan, enjeksiyon makine parametreleri (kalıp sıcaklığı, pişme zamanı ve enjeksiyon hızı) girdi değişkeni olarak seçilmiştir. Çalışma, Tekirdağ (Çerkezköy) bölgesinde çamaşır makinesi üretimi yapan bir fabrikanın tedarikçisi olan işletmede gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, tepki yüzeyi tasarımlarından 23 tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmış olup, deneyler çamaşır makinesi sızdırmazlık contası üretimi için gerçekleştirilmiştir. Minitab paket programı yardımıyla istatistiksel analizler uygulanmış olup, her bir tepki değişkeni için regresyon modeli geliştirilmiş ve tepki değişkenlerini optimize eden makine-süreç parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çoklu tepki optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen modeller için güvenilirlik analizi yapılarak sonuçların uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Deneysel Tasarım, Makine-Süreç Parametreleri, Kalite, Kauçuk

Optimization of Machine-Process Parameters with Response Surface Approach in Rubber Production

ABSTRACT: The purpose of the study is to optimize machine-process parameters which minimize quality errors and quality-sourced product cost in a rubber factory. For this purpose, product's quality characteristics (burst, torn, burn and burr) are determined as response variable. Injection machine parameters (mold temperature, cooking time and injection speed) that affect the determined quality properties, were selected as input variables. The study was carried out in a plant that is the supplier of a factory producing washing machines in the Tekirdağ (Çerkezköy) region. In this study, 23 full factorial experimental design which is called the response surface design was applied, experiments were carried out for the production of washing machine sealing gaskets. Statistical analysis was applied with the help of Minitab package program, regression model was developed for each response variable and multiple response optimization was performed in order to determine the machine-process parameter that optimizes the response variables. Reliability analysis was performed for the developed models and the applicability of the results was evaluated.

Key Words: Optimization, Experimental Design, Machine-Process Parameters, Quality, Rubber

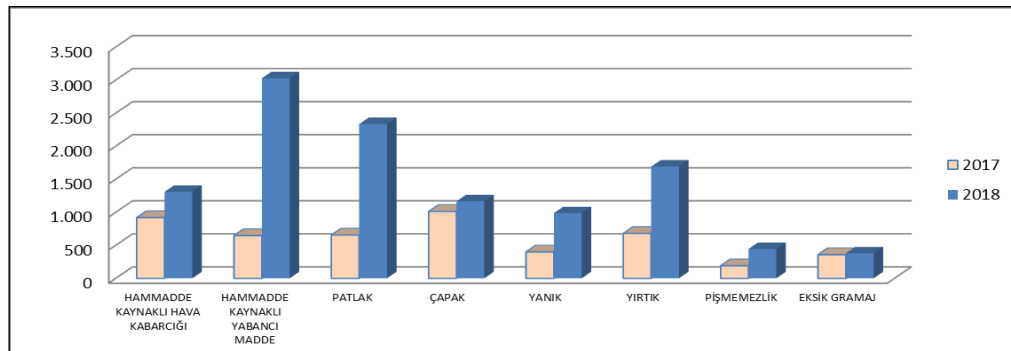
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kauçuk malzemesi, dayanıklı ve esnek bir yapıya sahip olması nedeniyle tekstil, otomotiv, beyaz eşya, inşaat, gıda, hayvancılık gibi pek çok sektörde sızdırmazlık elemanları, taşıtlarda tekerlek lastiği,

akaryakıt ve hidrolik fren hortumları, transmisyon kayışları, contalar, ses ve titreşim önleyici ürün üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kauçuk hammaddesi kullanılarak üretim yapılan işlemlerde; kalite ve performansta gerçekleştirilecek iyileştirmeler, elde edilecek ürünün maliyeti ve kalitesi açısından çok büyük önem arz etmektedir. Kauçuk hammaddesinin yüksek fiyatlı olması ve belirli işlemlere tabii tutularak yeniden kullanımının mümkün olmaması nedeniyle; üretim sürecinde fire ve kayıpların azaltılması, işletmeler için çözüm getirilmesi gereken öncelikli sorunlar arasında olup, maliyet ve kalite ekseninde işletmenin rekabet gücünün artırılmasına önemli katkı sağlama potansiyeline sahiptir (Acıgöz, 2014, Erbatır ve Erkek 2007).

Bu çalışmada; kauçuk hammaddesi kullanılarak üretim yapılan bir işletmede; üretilen ürünün kalite özelliklerine etki eden makine-süreç parametreleri incelenmiş olup, kalite hataları kaynaklı toplam maliyetin minimum yapılarak, istenilen kalitede ürün üretilebilmesi amacıyla bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan çoklu tepki optimizasyon modeli çalıştırılmış ve ürün kalitesini ve kalite kaynaklı ürün maliyetini minimize eden makine-süreç parametrelerinin değeri tahmin edilmiştir. Bu kapsamda; kauçuk üretim sektöründe; deneysel tasarım ve optimizasyon ekseninde kalite ve maliyet optimizasyonu amacıyla, makine-süreç parametrelerinin tahmin edilmesine yönelik daha önce yapılmış herhangi bir çalışmaya rastlanmamış olması; çözümü araştırılan problemi daha da önemli hale getirmektedir. Çalışmada; kullanım alanı çok geniş olan “EPDM” (Ethylene Propylene Diene Monomer) kauçuk hammaddesinden oluşturulan ve belirli kalite değerini sağlayan, enjeksiyon makinesinde şekillendirilmiş ürünün, kalite hataları ve kalite hataları kaynaklı ürün maliyetinin minimizasyonu için tepki yüzeyi deneysel tasarımlarından tam faktöriyel tasarım uygulanarak makine-süreç parametrelerinin optimum değerleri belirlenmiş olup, bu süreçte elde edilecek tasarrufun boyutu hesaplanmıştır. Kauçuk hammaddesinin işlem gördükten sonra yeniden kullanımının mümkün olmaması, hammadde maliyetinin yüksek olması, ayrıca, ürün maliyetinin minimize edilmesi konusunda daha önceden yapılmış herhangi bir optimizasyon çalışmasının olmaması, kalite hataları kaynaklı hurdaya ayrılan ürünlerin azaltılmak istenmesi, ve dünyadaki kauçuk hammaddesi kullanımının son yıllarda hızlı bir artış göstermesi ekseninde edilecek tasarrufun boyutu düşünüldüğünde; çözümü araştırılan problemin önemi açıktır. Bu kapsamda; yapılan çalışma sonuçlarının uygulamada devreye alınması ile çalışmanın faydasının daha da artması beklenmektedir.

İncelenen problemde, ürün kalite kabul testleri “EPDM” kauçuktan üretilen çamaşır makinesi FX 887 sızdırmazlık contası üzerinde yapılmıştır. Çalışmanın yapıldığı işletmede; FX 887 sızdırmazlık contası için, 2017-2018 yılları arasında proses koşullarından kaynaklanan hatalar nedeniyle fire olarak ayrılan malzemeler için oluşturulan hata grafiği (Şekil 1)’de gösterilmiştir.

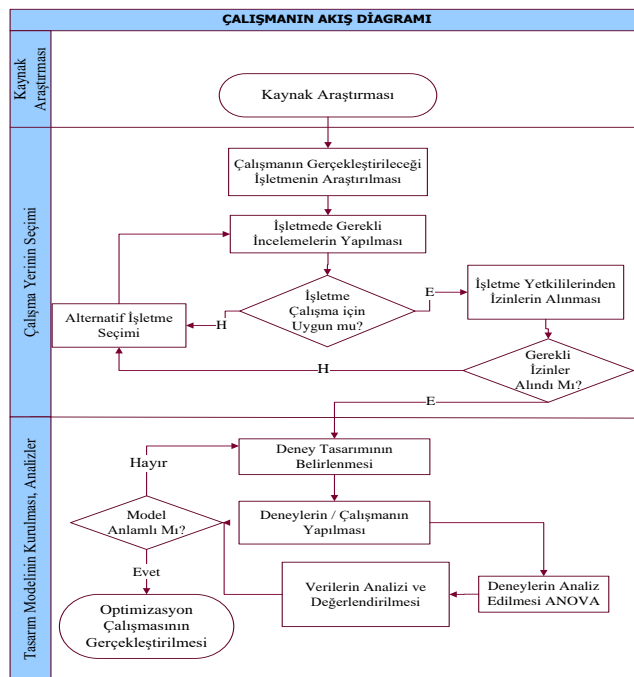


Şekil 1. Sızdırmazlık contası üretiminde karşılaşılan hatalar (2017 ve 2018 yılları)

Figure 1. Failures encountered in the production of sealing gaskets (2017 and 2018 years)

Şekil 1 incelendiğinde; en çok karşılaşılan hataların; hava kabarcığı, patlak, yırtık, yanık, çapak, pişmemelik, dalma ve eksik gramaj olduğu görülmektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen çalışmada; patlak, yırtık, yanık ve çapak olmama gibi kalite özellikleri tepki değişkeni olarak belirlenmiştir. İşletmede yapılan incelemeler, tecrübelerin gözden geçirilmesi-değerlendirilmesi (know-how) ve bilimsel kaynaklardan da yararlanarak, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, pişme süresi gibi enjeksiyon parametreleri

karar değişkenleri (girdi değişkenleri) olarak seçilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği işletmede işletme politikası gereği, hammadde tedarikçilerinde bir değişiklik yapılamadığı için, hammadde kaynaklı hataların araştırılması olanaklı olmamıştır. Belirtilen kısıt nedeniyle; kalite hataları kaynaklı ürün maliyetinin azaltılması ve ürün kalitesinin optimize edilmesi amacıyla, süreç parametrelerini kapsayan bir deneysel tasarım oluşturulması ve tahmin modeli kurularak ürün kalitesine etki eden süreç parametrelerinin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Kauçuk hammaddesinin pahalı olması nedeniyle kalite problemlerinden kaynaklı yüksek maliyetin azaltılması, işlem görerek oluşan maddenin yeniden kullanılması mümkün olmadığı için hurdaya ayrılan ürünlerin minimize edilmesi ve makine proses parametrelerinin optimizasyonu konularında daha önceden herhangi bir çalışma yapılmamış olması çözümü araştırılan ve model geliştirilmeye çalışılan problemi daha da önemli hale getirmektedir. Çalışmanın planlama, uygulama ve analiz adımları, Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın akış diagramı

Figure 2. Work flow chart of the study

Kauçuk malzemesi kullanılarak yapılan ve istatistiksel deneysel tasarım uygulanarak tepkiyi optimize etmeyi amaçlayan çalışmalar konusunda detaylı bir literatür araştırması yapılmış olup, önceki çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Ghoreishy ve diğ. (2001) düşük boy oranlı çelik kuşaklı radyal lastiğin boncuk bölümü için optimize edilmiş kauçuk bileşiklerinin geliştirilmesi ile ilgili yaptıkları çalışmada; karışım deneyleri yaparak düşük boy oranlı çelik kuşaklı radyal lastiğin boncuk bölümünün çeşitli kısımları için optimize edilmiş lastik bileşikleri geliştirmişlerdir. Kukreja ve diğ. (2002) tepki yüzeyi tasarımı yaklaşımını kullanarak, kauçuk bileşiklerin bitkisel yağ ve karbon karası kullanılarak fiziksel ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Deney tasarımında beş seviyeli iki girdi değişkeni kullanılarak merkezi birleşik tasarım uygulanmıştır. Durmaz (2008) çalışmasında, Taguchi deneysel tasarım tekniklerini kullanarak kauçuk vulkanizasyonu aşamasında gerçekleştirilen bir uygulamaya yer vermiştir. Uygulamada, kauçuğun en önemli kalite karakteristiği olarak belirlenen kopma mukavemetinin maksimize edilmesi amaçlanmış olup, yapılan analizlerde mukavemet üzerinde potansiyel etkiye sahip olduğu düşünülen faktör/faktörler ve seviyeleri belirlenmiştir. Kaya (2009), yaptığı çalışmada karışım tasarımı yöntemi ile daire şeklinde bir conta olan “oringi” üretmek için 10 adet girdi değişkeni incelemiştir. Da Costa ve diğ. (2010) tarafından, tepki yüzeyi metodolojisi kullanılarak, polipropilen/etilen-propilen–dien monomer (EPDM)/ hurda kauçuk lastik karışımlarının analizi ve optimizasyonu incelenmiştir. Birlikte dönen ikiz bir ekstruder ve enjeksiyon kalıplamada uygun işlem

yapılmasından sonra, çekme dayanımı ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikler belirlenmiş ve tepki değişkenleri olarak kullanılmıştır. Liu ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada; atık lastik kauçuğun devulkanizasyonu konusu araştırılmış olup, reaksiyon sıcaklığı, basınç, zaman ve devulkanizan üzerindeki difenil disül konsantrasyonunun etkisinin araştırılması amacıyla, 2 seviyeli tam faktöriyel tasarım uygulanmıştır. Lasprilla-Botero ve diğ. (2016) su bazlı bileşenlerin kauçuktan metale bağlanma üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla kesirli faktöriyel tasarım ve tepki yüzey metodolojisi kullanmışlardır. Khed ve diğ. (2018) tarafından yapılan çalışmada; hibrit elyaf takviyeli çimentolu kompozit malzemesinin akışkanlık ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmış olup, bu amaçla farklı ebatlarda kauçuk kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, tepki yüzey yaklaşımı kullanılarak matematiksel ve istatistiksel analizler uygulanmıştır. Adamu ve diğ. (2018) ince agreganın kırıntı kauçuk malzemeleriyle kısmen değiştirilmesinin ve nano silisin ilave edilmesinin, sıkıştırılmış lastik tabakanın aşınma direnci üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi için tepki yüzeyi yaklaşımı çerçevesinde Box-Behnken deneysel tasarım kullanmıştır.

MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Çalışmada Kullanılan Malzeme (Material Used in the Study)

Deneylerde kullanılan malzeme; günlük yaşamda ve sanayide geniş kullanım alanına sahip, lastik malzemelerin temel maddesi olan “EPDM” kauçuk malzemesidir. Kauçuk malzemesi; sızdırmazlık elemanları, uçak lastikleri, hidrolik fren hortumları, amortisör vb. gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olup, otomotiv sektöründe büyük öneme sahip ve fonksiyonel parçaların üretiminin yanı sıra inşaat sektöründe de ısı yalıtım ürünlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Malzemenin en belirgin özellikleri; esnek ve düşük camsı geçiş sıcaklığıdır. “EPDM”, etilen, propilen ve dien monomenlerinden oluşmaktadır (Erbatur ve Erkek 2007). Çalışma kapsamında deneylerin gerçekleştirildiği işletmede; “EPDM” kauçuk malzemesine enjeksiyon işlemi uygulanmış ve sızdırmazlık ve titreşimleri sönmüleme özelliğine sahip olan FX 887 conta (Şekil 3) üretimi yapılmıştır.



Şekil 3. FX 887 Sızdırmazlık contası

Figure 3. Sealing gasket

İşletmeye alınan “EPDM” hammaddesinin girdi kontrol testleri tamamlandıktan sonra, testlere göre kabul gören EPDM hammaddesi üretim şartları göz önünde bulundurularak DESMA enjeksiyon makinesinde enjeksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Deneylerin gerçekleştirildiği enjeksiyon makinesi, Şekil 4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4. Deneyin gerçekleştirildiği DESMA enjeksiyon makinesi

Figure 4. DESMA injection machine where the experiment is carried out

Uygulanan Metodoloji (Applied Methodology)

Deneyel tasarım yöntemleri, mevcut ürünlerin iyileştirilmesi ve yeni ürün/ürünlerin geliştirilmesi amacıyla, mühendislik ve tasarım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Montgomery, 2013; Savaşkan ve diğ., 2004; Demir, 2004; Şanyılmaz, 2006). Deneysel tasarımın amacı; süreç performansını iyileştirmek için, süreci etkileyen ve bağımlı değişken (tepki değişkeni) üzerinde potansiyel etkiye sahip girdi değişkeni/değişkenleri olarak adlandırılan faktörler üzerinde istenilen değişikliklerin sistematik bir şekilde yapılmasıyla ve belirlenmiş olan bir tasarım matrisine göre, tepki değişkeni üzerindeki değişkenliğin tahmin edilmesi ve yorumlanmasıdır. Deneysel tasarım, süreç yada tepki değişkeni üzerinde etkili olması beklenen proses değişkenlerinin sistematik olarak değiştirilerek, deneylerin gerçekleştirilmesi şeklindedir (Montgomery, 2013; Eken ve Kokangül, 2018). Deneysel tasarım metodlarının uygulanması ile; kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen girdi değişkenleri ile tepki değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirlemek ve süreç optimizasyonunu gerçekleştirebilmek mümkün olmaktadır. Bu eksende istatistiksel deneysel tasarım, mühendislik çalışmalarında önemli ve verimli bir yaklaşımdır ve işletme koşulları değerlendirildiğinde; deneylerin ekonomik şartlar altında ve zaman kısıtının da göz önünde bulundurularak oluşturulması ve sonuçların doğru yorumlanması için deneysel tasarım metodlarının uygulanması etkin bir yaklaşımdır. (Montgomery, 2013; Savaşkan ve diğ., 2004). Tepki yüzeyleri tasarımı; tepki değişkeninin (bağımlı değişken) birden fazla girdi değişkenine bağlı olarak değiştiği ve bağımlı değişkeni optimum seviyeye getirmek için gerekli analizlerin yapılmasında ve uygun modelin oluşturulmasında kullanılan deneysel tasarım tekniklerinin bir bütünüdür. Tepki yüzeyleri deneysel tasarımı, süreci etkileyen karar değişkenleri arasındaki etkileşimi, etkileşimlerin olduğu durumda yönü ve şiddetini, sürecin daha etkili olduğu bağımsız değişkenin belirlenmesini ve bu süreci analiz eden bir yöntem olup, sağladığı avantajlar sebebiyle pek çok alanda kullanılmaktadır (Türkyılmaz, 2011; Aygün 2012). Tepki yüzeyi tasarımlarından biri olan faktöriyel tasarımlar, her bir tasarım noktasında bir faktörü incelemek yerine, faktörler ve faktör etkilerinin birlikte incelendiği bir tasarımdır. Faktöriyel tasarımlar; girdi değişkenlerinin çıktı değişkeni (bağımlı değişken) üzerindeki etkisini araştırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Faktöriyel tasarım etkileri; ana etki ve etkileşimleri olarak gruplandırılır. Tepki değişkeninin girdi değişkenine bağlı fonksiyonu Eşitlik 1. de gösterilmiştir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

Y : Tepki (bağımlı değişken) değişkeni,

β : Regresyon katsayısı,

x : Bağımsız değişken

ε :Deneysel hata

Eşitlik 1. incelendiğinde; girdi değişkenleri için, ana etkiler, etkileşimler ve hata teriminin modeli oluşturduğu görülmektedir. İncelenen problemde bağımlı değişkenler; ürünün patlak olmaması, yırtık, yanık ve çapak olmaması kalite özellikleridir. İşletmede elde edilen veriler değerlendirildiğinde; patlak, yırtık, yanık ve çapak hataları hammaddeden meydana gelen hatalardan sonra en çok rastlanılan hatalardır. Bu sebeple, bu hatalar bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Karar değişkenleri de, kalıp sıcaklığı, enjeksiyon hızı, pişme süresi olarak belirlenmiştir. Çalışmada, işletmenin kısıtları da göz önünde bulundurularak yapılan araştırmalar ile FX 887 sızdırmazlık contası üretimi sırasında faktöriyel deneysel tasarım kullanılarak karar değişkenlerinin tepki değişkenleri üzerindeki etkilerinin araştırılması amacıyla; merkez ve tüm deney noktalarında 3 deney tekrarı gerçekleştirilerek, 2^3 tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanmıştır. Değişkenliğin belirlenmesi amacıyla; her bir deney noktasında deney tekrarları (doğrulama deneyleri; merkez noktası ve her bir deney noktasında 3 deney tekrarı) gerçekleştirilmiş olup, toplam 27 adet deney yapılmıştır. Tekrarlama sayısının artmasıyla aralık kestiriminin kesinliği artmakta ve anlamlılık düzeyinde gerçekleştirilen istatistiksel anlamlılık sınavının gücünün de artırılması mümkün olmaktadır. Gerçekleştirilen deneyler rassallık prensibine göre yapılmış olup, deneysel verideki yanlı(sistemik) yanılığın ortaya çıkmasının önlenmesi amaçlanmıştır. Deneylerin arasında bir etkileşim olmaması amacıyla deneylerin sırası rastgele belirlenmiştir. Orta noktalarda da deneyler gerçekleştirilmiş olup, oluşabilecek rastgele hatanın belirlenmesi amaçlanmıştır. Her girdi değişkeni için iki seviye seçilmiştir. Girdi değişkenlerinin alt seviyeleri (-)1 üst seviyeleri ise (+1) ve orta nokta (0) işareti ile gösterilmiştir. Faktör seviyelerinin seçiminde; işletme koşulları ve kısıtları, zaman ve üretilebilirlik sınırı, işletmenin geçmiş tecrübe ve deneyimleri, hammadde maliyeti gibi sınırlamalar etkili olmuştur. Çizelge 1.'de yapılan deneysel çalışmanın girdi değişkenleri ve seviyeleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. Gerçek ve kodlanmış faktörler için deneysel tasarım matrisi

Table 1. Experimental design matrix for real and coded factors

Deney No	Kodlanmış Değişkenler			Gerçek Değişkenler			Tepki Değişkeni
	X ₁	X ₂	X ₃	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Pişme Zamanı (s)	Enjeksiyon Hızı (mm/s)	
1	-1	-1	-1	225	60	12,7	y ₁
2	+1	-1	-1	246	60	12,7	y ₂
3	-1	+1	-1	225	86	12,7	y ₃
4	-1	-1	+1	225	60	17	y ₄
5	+1	+1	-1	246	86	12,7	y ₅
6	-1	+1	+1	225	86	17	y ₆
7	+1	-1	+1	246	60	17	y ₇
8	+1	+1	+1	246	86	17	y ₈
9	0	0	0	235,5	73	14,85	y ₉

ARAŞTIRMA BULGULARI (RESEARCH FINDINGS)

Yapılan çalışmada; tepki yüzeyi yaklaşımı ekseninde 2^3 tam faktöriyel deney tasarımı uygulanmış olup, ürünün patlak, yırtık, yanık ve çapak olmaması kalite özellikleri tepki değişkeni olarak; kalıp sıcaklığı, pişme zamanı ve enjeksiyon hızı girdi değişkeni olarak seçilmiş ve tepki yüzeyi deneysel tasarım modeli geliştirilerek, ana etkiler ve etkileşimler analiz edilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği işletmede; üretilen sızdırmazlık contasının hammaddesi olan kauçuk maddesinin üretime uygunluğunun kontrol edilmesi amacıyla, bazı girdi kalite kontrol testleri yapılmaktadır. Bu ekseninde; yapılan çalışma kapsamında hazırlanan numuneler için; sertlik, rheometre ve yoğunluk testleri uygulanmıştır. Rheometre testinde; pişmemiş kauçuk malzemesinden numune alınarak "rheometre" cihazında pişirilmiş ve pişme

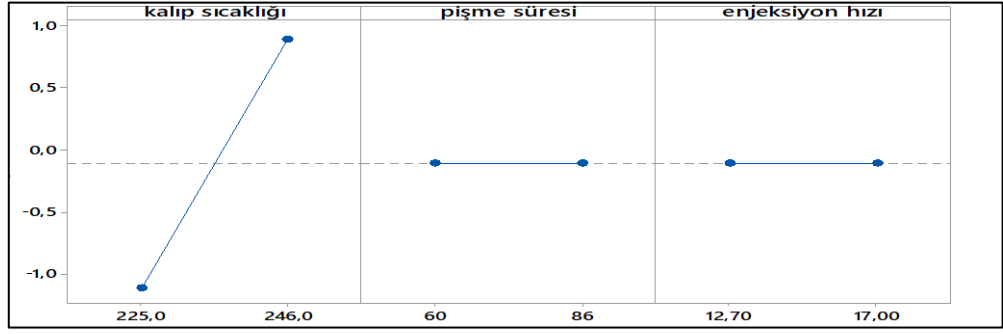
grafik değerlerinin belirlenen aralıklara uygunluğu kontrol edilmiş olup, testler DIN 53529 standardına göre Alpha Rheometer ODR 2000 cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada; tepki yüzeyi deney tasarımlarından tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak belirlenen niteliklere göre rassal olarak deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Minitab programı yardımıyla analiz edilmiştir. Patlak olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi (analysis of variance; ANOVA) sonuçları Çizelge 2' de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Patlak olmaması tepki değişkeni için varyans analizi (ANOVA) tablosu

Table 2. Variance analysis (ANOVA) table (no-break response variable)

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	24,0000	3,4286	24,43	0,000
Girdi Değişkenleri	3	24,0000	8,0000	57,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	24,0000	24,0000	171,00	0,000
pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
2 li Etkileşimler	3	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
3 lü Etkileşimler	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Hata	19	2,6667	0,1404		
Eğrilik	1	2,6667	2,6667	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	26,6667			

Çizelge 2' den de görüldüğü gibi; patlak olmaması tepki değişkeni için regresyon modelindeki değişkenliğin kaynağı; pişme süresi, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi girdi değişkeni olarak seçilen bağımsız değişkenlerdir. Faktör etkilerinin patlak olmaması tepki değişkeni incelenebilmesi amacıyla %95 güven aralığında F testi yapılmış F testi ve p anlamlılık değeri ($\alpha=0,05$) kullanılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Çizelge 2' de kalıp sıcaklığının p değeri 0,05' ten küçük olması nedeniyle yalnızca kalıp sıcaklığının etkisinin patlak olmaması tepki değişkeni için istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmüştür. Diğer faktörler ile bu faktörlere bağlı etkileşimlerinin p değerleri 0,05'ten büyük olması sebebiyle istatistiki açıdan anlamlı olmadıkları yani kalıp sıcaklığı girdi değişkeninin patlak olmaması kalite özelliğine etkisinin istatistiksel olarak etkisinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu belirlenmiştir. Ana faktör ve faktör etkileşimlerinin bağımlı değişken üzerindeki anlamlılığı değerlendirildiğinde, verilerin normal dağılıma uyduğu varsayımı altında testler gerçekleştirilmiştir. Patlak olmaması bağımlı değişkeni için ana faktörlerin etkisi Şekil 5' te gösterilmiştir.



Şekil 5. Patlak olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği

Figure 5. Factor effects graph for no-burst response variable

İstatistiksel değerlendirmeler sonucunda; patlak olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 2.' de gösterilmiştir.

$$Y_{\text{patlak olmaması}} = -22,5 + 0,095X_1 \quad (2)$$

$$x_1 = \text{kalıp sıcaklığı}$$

Geliştirilen modelden de görüldüğü gibi; kalıp sıcaklığı arttığında yırtık olmaması kalite değişkeni de artmaktadır. Pişme süresi ve enjeksiyon hızı girdi değişkenlerinin patlak olmaması tepki değişkeni için etkisinin %5 anlamlılık seviyesinde istatistiksel olarak ihmal edilebileceği belirlenmiştir. Modelin tahmin gücünün belirlenmesi amacıyla hesaplanan istatistiklerden, R^2_{adj} değeri %86,32 olarak bulunmuştur. Bu durum, patlak oluşması hatasının %86,32' sinin kalıp sıcaklığı faktöründen kaynaklandığını göstermektedir. Patlak olmaması bağımlı değişkeninin %13,68' lik değişkenliğinin ise kalıp sıcaklığı faktörü dışında diğer değişkenlerden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Patlak olmaması kalite değişkeni için yapılan analizlere benzer olarak, yırtık olmaması tepki değişkeni için de varyans analizi ve regresyon tahmin modelleme gerçekleştirilmiş olup, yırtık olmaması bağımlı değişkeni üzerindeki kalıp sıcaklığı faktörünün en çok etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Diğer karar (girdi) değişkenlerinin yırtık olmaması bağımlı değişkenine etkisinin %5 anlamlılık seviyesinde ihmal edilebilecek kadar az olduğu belirlenmiştir. Yırtık olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 3' te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Yırtık olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu*Table 3. Variance analysis (ANOVA) table (no-tear response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	24,0000	3,4286	24,43	0,000
Girdi değişkenleri	3	24,0000	8,0000	57,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	24,0000	24,0000	171,00	0,000
pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
2 li Etkileşimler	3	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
3 lü Etkileşimler	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
Hata	19	2,6667	0,1404		
Eğrilik	1	2,6667	2,6667	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	26,6667			

Çizelge 3' ten de görüldüğü gibi; yırtık olmaması tepki değişkeni regresyon modelindeki değişkenliğin kaynağı; pişme süresi, kalıp sıcaklığı ve enjeksiyon hızı gibi girdi değişkeni olarak seçilen bağımsız değişkenlerdir. Faktör etkilerinin yırtık olmaması tepki değişkeni incelenebilmesi amacıyla %95 güven aralığında F testi yapılmış F testi ve p anlamlılık değeri ($\alpha=0,05$) kullanılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Çizelge 3' te kalıp sıcaklığının p değeri 0,05' ten küçük olması nedeniyle yalnızca kalıp sıcaklığının etkisinin yırtık olmaması tepki değişkeni için istatistiksel açıdan anlamlı olduğu görülmüştür. Diğer faktörler ile bu faktörlere bağlı etkileşimlerinin p değerleri 0,05'ten büyük olması sebebiyle istatistiki açıdan anlamlı olmadıkları yani kalıp sıcaklığı girdi değişkeninin yırtık olmaması kalite özelliğine etkisinin istatistiksel olarak etkisinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu belirlenmiştir. Yırtık olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 3. ile formülize edilmiştir:

$$Y_{\text{yırtık olmaması}} = -22,5 + 0,095x_1 \quad (3)$$

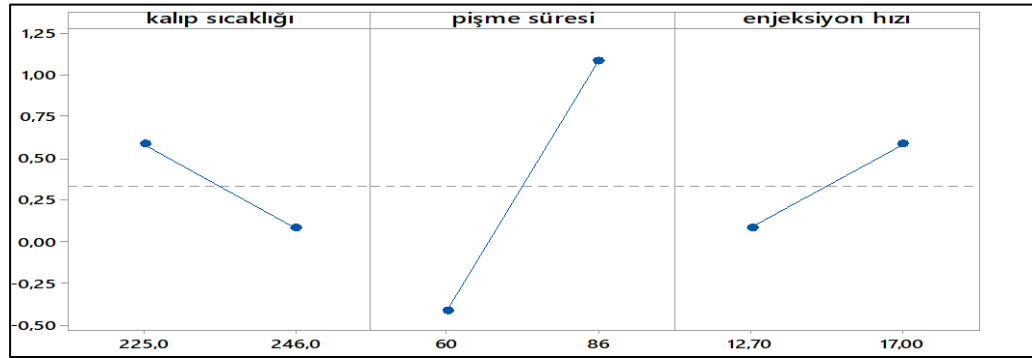
$$x_1 = \text{kalıp sıcaklığı}$$

Yanık olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 4' te gösterilmiştir.

Çizelge 4. Yanık olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu*Table 4. Variance analysis (ANOVA) table (no-burn response variable)*

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	22,5000	3,2143	40,71	0,000
Girdi değişkenleri	3	16,5000	5,5000	69,67	0,000
kalıp sıcaklığı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
pişme süresi	1	13,5000	13,5000	171,00	0,000
enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
2 li Etkileşimler	3	4,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
3 lü Etkileşimler	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,5000	19,00	0,000
Hata	19	1,5000	0,0789		
Eğrilik	1	1,5000	1,5000	*	*
Saf hata	18	0,0000	0,0000		
Toplam	26	24,0000			

Çizelge 4 incelendiğinde; faktörlerin ve faktör etkilerinin p değerinin 0,05' ten küçük olduğu için, ana faktör ve faktör etkileşimlerinin tepki değişkenine etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Geliştirilen modelden ve faktör etki grafiğinden görüleceği üzere (şekil 6); kalıp sıcaklığı arttığında yanık olmaması kalite özelliğinin azaldığı, pişme süresi faktörünün etkisinin en büyük olduğu, diğer karar değişkeni olan enjeksiyon hızı girdi değişkeninin de yanık olmaması tepki değişkeni üzerinde %5 anlamlılık seviyesinde anlamlı ve negatif etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

**Şekil 6.** Yanık olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği*Figure 6. Factor effects graph for no burn response variable*

Faktörlerin ikili etkileşimleri değerlendirildiğinde; yanık olmaması tepki değişkeni için faktör etkileşimlerinin anlamlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan regresyon analizine göre; yanık olmaması bağımlı değişkeninin regresyon denklemi Eşitlik 4.ile formülize edilmiştir.

$$Y_{\text{yanık olmaması}} = -234,4 + 0,930x_1 + 2,738x_2 + 18,02x_3 - 0,01082x_1 x_2 - 0,0733x_1 x_3 - 0,2096x_2 x_3 + 0,000852x_1 x_2 x_3 \quad (4)$$

x_1 =kalıp sıcaklığı,
 x_2 =pişme süresi,
 x_3 =enjeksiyon hızı

Oluşturulan regresyon tahmin modelinin R^2_{adj} değeri %91,45 olarak hesaplandığından; deneysel tasarım modelinde etkili olan karar değişkenlerinin, yanık olmaması bağımlı değişkenindeki değişkenliğin %91,45'ini açıkladığı sonucuna ulaşılmıştır. Çapak olmaması bağımlı değişkeni için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 5' te gösterilmiştir.

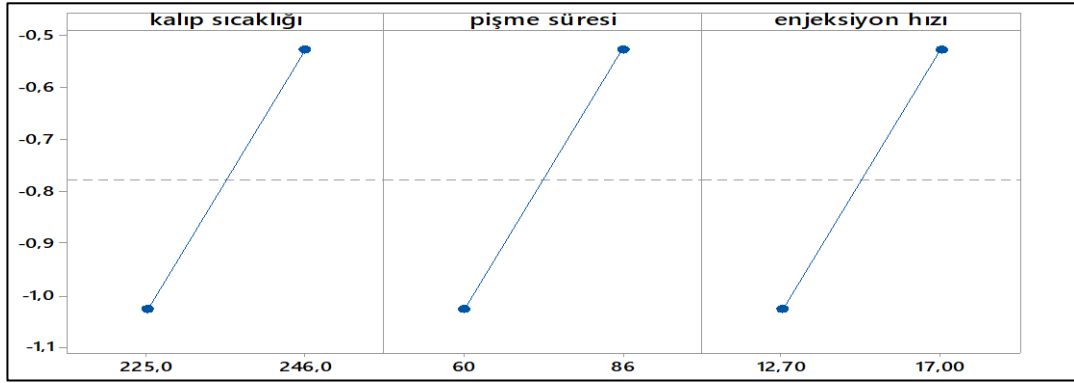
Çizelge 5. Çapak olmaması tepki değişkeni varyans analizi (ANOVA) tablosu

Table 5. Variance analysis (ANOVA) table (no-burr response variable)

Değişkenliğin Kaynağı	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Değeri	Anlamlılık Seviyesi
Model	7	10,5000	1,50000	171,00	0,000
Girdi Değişkenleri	3	4,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
pişme süresi	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
2 li Etkileşimler	3	4,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
3 lü Etkileşimler	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
kalıp sıcaklığı*pişme süresi*enjeksiyon hızı	1	1,5000	1,50000	171,00	0,000
Hata	19	0,1667	0,00877		
Eğrilik	1	0,1667	0,16667	*	*
Saf Hata	18	0,0000	0,00000		
Toplam	26	10,6667			

Çizelge 5. incelendiğinde; tüm faktörlerin ve faktör etkilerinin p değerinin 0,05'ten küçük olduğu ve anlamlı oldukları görülmektedir. Bu eksende; tüm faktörler ve faktör etkileşimlerinin tepki değişkenine etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

Çapak olmaması bağımlı değişkeni için, deney sonuçları, Minitab programı yardımıyla analiz edilmiş olup, %95 güven aralığında varyans analizi uygulanmış olup, faktör etkileri grafiği (Şekil 7)' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çapak olmaması tepki değişkeni için faktör etkileri grafiği

Figure 7. Factor effects graph for no burr response variable

Çapak olmaması bağımlı değişkeni incelendiğinde en etkili faktörün enjeksiyon hızı olduğu diğer girdi değişkenlerinin de anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çapak olmaması bağımlı değişkenine ait regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$Y_{\text{çapak olmaması}} = -147,1 + 0,6491x_1 + 2,434x_2 + 11,50x_3 - 0,010819x_1 x_2 - 0,05111x_1 x_3 - 0,1917x_2 x_3 + 0,000852x_1x_2 x_3 \quad (5)$$

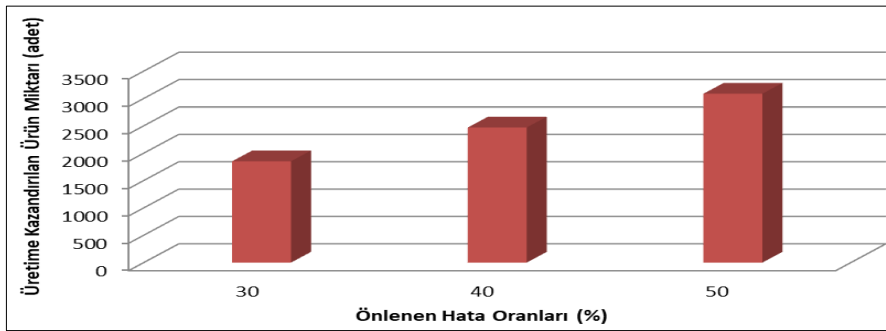
x_1 =kalıp sıcaklığı,

x_2 =pişme süresi,

x_3 =enjeksiyon hızı

Geliştirilen modelin R^2_{adj} değerinin %97,32 olarak hesaplanmış olup, deneysel tasarım modelinde etkili olan kalıp sıcaklığı karar değişkeni, çapak olmaması girdi değişkenlerinin, tepki değişkeni üzerindeki değişkenliğin %97,86' ini açıkladığı belirlenmiştir.

Yapılan çalışmada incelenen kalite değişkenleri kaynaklı hataların minimuma indirilmesi için, tepki yüzeyi tasarımları yaklaşımı ile çoklu tepki optimizasyonu uygulanarak incelenen girdi değişkenlerinin optimum değeri belirlenmiştir. Çalışmanın yapıldığı enjeksiyon makinesine kalıp sıcaklığı 236.55 °C, pişme süresi 71.7 sn ve enjeksiyon hızı ise 12.9 mm/sn olarak ayar yapıldığında; ortaya çıkan firelerin (müşteriden iade edilen ürün) minimize edilmesi sağlanmış olacaktır. İşletmenin mevcut verileri incelendiğinde; 2018' de 11328 adet firenin 6173 tanesi (toplam hataların %54' ü) bağımlı değişken olarak belirlenen hatalardan kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır. Öngörülen modelin uygulamada devreye alınması sonucunda; tepki değişkeni kaynaklı hatanın %54' ünün önlenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Gerçekleştirilen analizler çerçevesinde; işletmede herhangi teknolojik yada makine yatırımı yapılmadan sadece makine-süreç parametrelerindeki optimizasyon sonuçlarının uygulanması ile; incelenen hatalarda %30, %40 ya da %50 oranlarında iyileştirme sağlayacağı düşünülecek olursa; üretime kazandırılan ürün miktarı ve önlenecek hata oranları grafiği Şekil 8.' de verilmiştir.



Şekil 8. Üretime kazandırılan ürün miktarı ile önlenen hata oranları grafiği
Figure 8. Graph of the amount of product prevented by the amount of product brought into production

Şekil 8.'den de görüleceği üzere; sızdırmazlık contası üretiminde, makine-proses parametrelerinin optimize edilmesi durumunda; 2017-2020 yılları arasında, en çok karşılaşılan kalite problemlerinin müşteriye ulaşmadan önce önemli ölçüde bertaraf edilmesi mümkün olacaktır. Gerçekleştirilen çalışmanın; kauçuk üretim sektöründe faaliyet gösteren işletmelerde; kalite kaynaklı hatalarının önüne geçilmesi, müşteri şikâyet sayısında azalma, imalat programlarının aksamaması ve sevkiyatların tam zamanlı gerçekleşmesi bakımından artı değer katacağı düşünülmektedir.

SONUÇ ve TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

Yapılan çalışmada; plastik enjeksiyon makinesinde kalite hatalarının minimizasyonu amacıyla, istatistiksel deneysel tasarım metodu kullanılarak makine-proses parametrelerinin optimizasyon problemi irdelenmiştir. Bu amaçla, Çerkezköy bölgesinde plastik sanayiinde faaliyet gösteren bir işletmede kauçuk malzemesinden FX 887 sızdırmazlık contası üreten bir işletmede uygulama yapılmıştır. İşletmede gerçekleştirilen araştırmalar çerçevesinde en sık rastlanan kalite problemleri belirlenmiş ve bu hatalardan kaynaklı maliyetlerin fazla olduğu görülmüştür. Belirlenen kalite hatalarını minimize etmek için, tepki yüzeyi tasarımlarından 2³ tam faktöriyel deneysel tasarım uygulanarak, regresyon tahmin modelleri oluşturulmuş ve çoklu tepki optimizasyonu ile, makine-proses parametrelerinin (kalıp sıcaklığı, pişme süresi ve enjeksiyon hızı) optimum değerleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada işletme kısıtlarından dolayı çok fazla sayıda deney tekrarı yapma imkânı olmamıştır. İleriki çalışmalarda; kaynakların daha etkin ve verimli kullanılması amacıyla; daha geniş aralıkta deneysel tasarım noktalarında daha fazla sayıda deneyler gerçekleştirilerek, araştırmanın işletmeye sağlayacağı maddi kazanımların boyutu değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Acıgöz, M., 2014, Türkiye' de Kauçuk Sektörü ve Sorunları, Namık Kemal Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Adamu M., Mohammed BS., Shafiq N., Liew MS., Alaloul WS. 2018, "Effect of Crumb Rubber And Nano Silica On The Durability Performance Of High Volume Fly Ash Roller Compacted Concrete Pavement", International Journal of Advanced and Applied Sciences, Sayı 5, ss 53-61.
- Aygün, A., 2012, "Tekstil Endüstrisi Reaktif ve Dispers Boya Banyo Atıksularının Elektrokoagülasyon Prosesi ile Arıtımı: Yanıt Yüzey Yöntemi ile Optimizasyonu", Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya.
- Da Costa, HM., Ramos, VD., Da Silva, WS. ve Sirqueira, AS., 2010, "Analysis and Optimization of Polypropylene (PP) / Ethylene-Propylene-Diene Monomer (EPDM) / Scrap Rubber Tire (SRT) Mixtures Using RSM Methodology", Polimer Testing, Cilt 29, Sayı 5, ss. 572-578.
- Demir, L., 2004, "İstatistiksel Deneysel Tasarım Yöntemi ve Bir Tekstil İşletmesinde Uygulanması", Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Denizli.

- Durmaz, S., 2008, "Taguchi Metodunun Kauçuğun Vulkanizasyonu Prosesine Uygulanması", Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Erbatur, O. ve Erkek, E., 2007, "Karbon Siyahı/Yağ ve Karbon Siyahı/Dolgu Maddesi Oranının Farklı Vulkanizasyon Sistemlerinde Epdm Kauçuğunun Fizikomekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi", Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Ghoreishy, MHR., Karrabi, M., Nouri, MR., 2001, "Development of Optimized Rubber Compounds for the Components of the Bead Section of A Low Aspect Ratio Steelbelted Radial Tire", Iranian Polymer Journal, Cilt 10, ss. 115-123.
- Kaya, Y., 2009, "Karışım Tasarımı Yöntemiyle Lastik Esaslı Yeni Bir Ürün Geliştirilmesi", Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Khed, VC., Mohammed, BS., Nuriddin, MF., 2018, "Effects of different crumb rubber sizes on the flowability and compressive strength of hybrid fibre reinforced ECC", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Cilt 140, Sayı 1, ss. 12137.
- Kukreja, TR., Kumar, D., Prasad, K., Chauhan, RC., Choe, S. ve Kundu, PP. 2002, "Optimisation of Physical and Mechanical Properties of Rubber Compounds by Response Surface Methodology-Two Component Modelling Using Vegetable Oil and Carbon Black", European Polymer Journal, Sayı 38, ss.1417-1422.
- Lasprilla-Boteroa J., Álvarez-Láinez M. ve Acostab DA., 2016, "Water-Based Adhesive Formulations For Rubber To Metal Bonding Developed By Statistical Design Of Experiments", International Journal of Adhesion and Adhesives, Cilt73, ss. 58-65.
- Liu, Z., Li, X., Xu, X., Wang, X., Dong, C., Liu, F. ve Wei, W., 2015, "Devulcanization of Waste Tead Rubber in Supercritical Carbon Dioxide: Operating Parameters And Product Characterization", Polymer Degradation and Stability, Cilt 119, ss. 198-207.
- Montgomery C. Douglas., 2013, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. ve Ürgen, M., 2004, "Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyon", itüdergisi/d mühendislik, Cilt 3, ss. 117-128.
- Şanyılmaz, M., 2006, "Deney Tasarımı ve Kalite Geliştirme Faaliyetlerinde Taguchi Yöntemi ile Bir Uygulama", Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Türkyılmaz, H., 2011, "Kurşun İyonlarının Kesikli Adsorpsiyon Proses ile Gideriminin Cevap Yüzey Yöntemiyle Optimizasyonu", Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Isparta



GEODETTIC ERRORS ARISING FROM THE DIFFERENCES BETWEEN SK-42 AND WGS-84 COORDINATE SYSTEMS WHEN IMPLEMENTED IN MODERN WEAPONS SYSTEMS

¹İlgar MUSAYEV , ²Magsad GOJAMANOV 

¹Azercosmos Open Joint-Stock Company, Uzeyir Hajibeyli - 72, Baku, AZERBAIJAN

²Baku State University, Z.Khalilov – 23, Baku, AZERBAIJAN

¹ilgar2533@gmail.com, ²mgodja@yandex.ru

(Geliş/Received: 31.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.12.2020)

ABSTRACT: Modern weapons, technological systems, and facilities used in our days mainly are either managed with digital topographic maps produced in WGS-84 (World Geodetic System-1984) coordinate system or are connected with Military Geographic Information System (MGIS) created on the base of this coordinate system. If we use topographic maps based on the 1942 coordinate system in computer systems of modern weapons, and other technological systems and facilities, then it will be inevitable to encounter some geodesy related errors. In this article, these errors and their possible solutions are explained in the case of using the Krassovsky coordinate system in Azerbaijan.

Key Words: WGS-84, SK-42, MGIS, GNSS, topocentric

Modern Silah Sistemlerinde Uygulandığında SK-42 ve WGS-84 Koordinat Sistemleri Arasındaki Farklılıklardan Kaynaklanan Hatalar

ÖZ: Günümüzde kullanılan modern silahlar, teknolojik sistemler ve tesisler ağırlıklı olarak ya WGS-84 (Dünya Jeodezik Sistemi-1984) koordinat sisteminde üretilen sayısal topografik haritalarla veya temelinde şu koordinat sistemi oluşturulan Askeri Coğrafi Bilgi Sistemi esasında yönetilmektedir. Eğer modern silahların bilgisayar sistemlerinde ve diğer teknolojik sistem ve tesislerde 1942-ci yıl koordinat sistemine dayalı topografik haritaları kullanırsak, jeodezi ile ilgili bazı hatalarla karşılaşmamız kaçınılmaz olacaktır. Bu makale, Azerbaycan'da Krasovski koordinat sistemini kullanırken meydana gelebilecek hataları tartışmakta ve bunların nasıl çözüleceğini açıklamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dünya Jeodezik Sistemi WGS-84, Krasovski Koordinat Sistemi SK-42, Askeri Coğrafi Bilgi Sistemi, Küresel Navigasyon Uydu Sistemi, toposentrik

1. INTRODUCTION

In the Global Navigation Satellite System (GNSS) technique, point coordinates are expressed as geocentric (X, Y, Z) or geodetic latitude, longitude, and ellipsoidal heights (φ , λ , h) based on WGS-84 ellipsoid. Several errors occur when GNSS derived coordinates are used in the field together with the published topographic maps based on Krassovsky coordinate system (SK-42). These errors appear due to the following reasons:

- Differences in three-dimensional spatial cartesian coordinate systems;
- Differences between ellipsoidal and orthometric heights;
- Differences in the projections of the map systems;

- Differences in a plane rectangular coordinate systems.

2. DIFFERENCES IN THREE-DIMENSIONAL SPATIAL CARTESIAN COORDINATE SYSTEMS

First of all, it should be noted that when creating maps, two coordinate systems are used. One of them is a three-dimensional cartesian coordinate system, the origin of which is located in the center of the Earth. This coordinate system is called geocentric. The geocentric coordinate system determines the shape of the Earth's ellipsoid on which the map is drawn. The second coordinate system is a two-dimensional (x, y) plane rectangular coordinate system. The origin of this coordinate system is taken from a point on the surface of the Earth - usually the intersection of the equator and the Greenwich meridian. A local rectangular coordinate system is called a "topocentric" coordinate system (Fig. 1), (URL1).

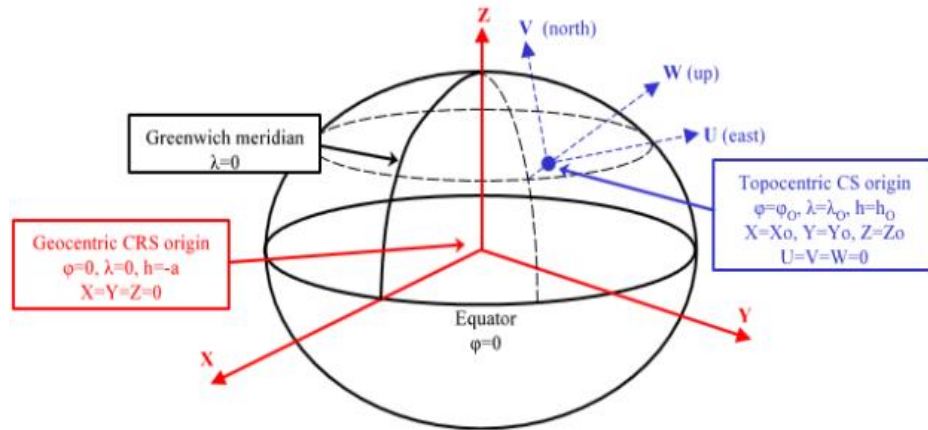
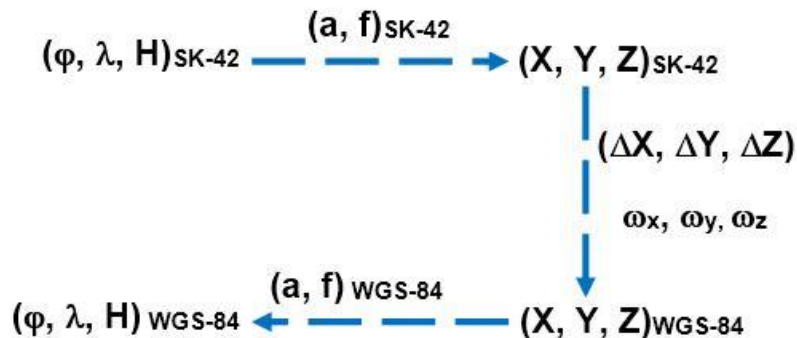


Figure 1. Geocentric and topocentric coordinate systems (URL1)

To define the rectangular topocentric coordinates of raster (electronic) topographic maps in the SK-42 coordinate system, GPS navigators must enter seven transformation parameters into the receiver's memory. These parameters are as follows:

- $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ - coordinate shift;
- $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - rotation angles;
- m - scale factor.

The transformation from the SK-42 coordinate system to the WGS-84 can be shown as follows (Musayev, 2007):



Where:

- $\Delta X = X_{WGS-84} - X_{SK-42}$, $\Delta Y = Y_{WGS-84} - Y_{SK-42}$, $\Delta Z = Z_{WGS-84} - Z_{SK-42}$
- φ – geodetic latitude, $\varphi_{SK-42} = \varphi_{WGS-84} - \Delta\varphi$
- λ – geodetic longitude, $\lambda_{SK-42} = \lambda_{WGS-84} - \Delta\lambda$
- a – semi-major axis of the Earth ellipsoid
- b – semi-minor axis of the Earth ellipsoid
- f – flattening of the Earth ellipsoid
- H – orthometric height measured from mean sea level.

Here is,

$$f = \frac{a - b}{a}$$

For example, for the Earth's ellipsoid of the Krassovsky geodetic system $a = 6\,378\,245$ m and $b = 6\,356\,863$ m. The illustration of this ellipsoid is shown in Fig. 2:

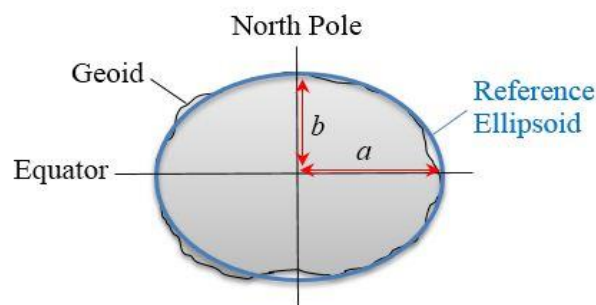


Figure 2. Earth reference ellipsoid

$$f = \frac{a - b}{a} = \frac{21\,382\text{m}}{6\,378\,245} = 1:298.3$$

The values of transformation parameters between some coordinate systems are shown in Table 1 (Gennike and Pobedinsky, 1999):

Table 1. Transformation parameters between different coordinate systems

Transient parameters	Coordinate systems			
	SK-42 PZ-90*	WGS-72 WGS-84	SK-42 WGS-84	PZ-90 WGS-84
ΔX (m)	+25	0	+25	0
ΔY (m)	-141	0	-141	0
ΔZ (m)	-80	+4,5	-78,5	+1,5
$m \times 10^{-6}$	0	+0,227	0	0
ω_x (")	0"	0"	0"	0"
ω_y (")	-0,35"	0"	-0,35"	0"
ω_z (")	-0,66"	-0,554"	-0,736"	-0,076"

The PZ-90 (Параметры Земли 1990 года, Earth Parameters 1990) geocentric coordinate system had been proposed by geodetic scientists of the Russian Federation as a result of GLONASS / GPS measurements (Vdovin, 2012). As shown in Table-1, most parameters of the SK-42 coordinate system differ from the parameters of the WGS-84 coordinate system.

The geographic coordinates (φ , λ) of the Krassovsky ellipsoid are transformed into the absolute geographic coordinates of the WGS-84 ellipsoid using seven parameters (ΔX , ΔY , ΔZ , ω_x , ω_y , ω_z , m) calculated with precise formulas. However, this is not sufficient, it is also necessary to calculate the difference between the ellipsoidal and the orthometric heights to ensure a complete transformation from the SK-42 coordinate system to the WGS-84 coordinate system.

3. RELATION BETWEEN ELLIPSOIDAL AND ORTHOMETRIC HEIGHTS

The ellipsoidal height (h) from the WGS-84 ellipsoid measured by GNSS receivers differs from the orthometric height (H) measured above sea level on topographic maps of the SK-42 coordinate system (Fig. 3). Here, N is called geoid height which is the difference between ellipsoidal and orthometric heights.

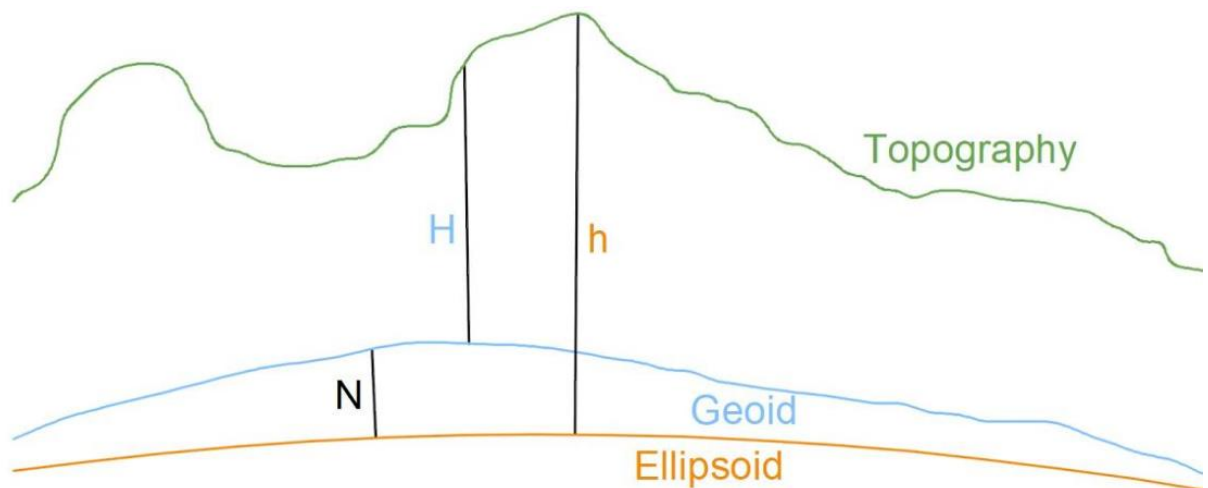


Figure 3. Relation among ellipsoidal, orthometric and geoid heights (Dave, 2017)

To show this difference a field work was conducted on 15th July 2014. Measurements were performed on class II geodetic point on Goyundag (Azerbaijan, Gobustan district) using two GNSS receivers. The ellipsoidal height measured by the 1-st receiver was - 315m and the 2-nd GPS receiver was - 317m, while the orthometric height taken from the published coordinates of the same geodetic point was 327.6m. Fieldworks show that the difference between ellipsoidal and orthometric height varies between + 12.6m and + 10.6m.

4. DIFFERENCES IN THE PROJECTIONS OF THE MAP SYSTEMS

Most GNSS-equipped navigation devices work on maps in the WGS-84 coordinate system and UTM (Universal Transverse Mercator) projection. Basic GIS software also works in the WGS-84 coordinate system and UTM projection maps. But the coordinate system SK-42 has been developed for maps with the Gauss-Krüger Cylindrical Conformal Projection. The UTM and Gauss-Krüger projections differ from each other in terms of the mathematical requirements of cartography. In the Gauss-Krüger projection, due to the projected 6⁰-zone osculating onto the cylinder, the scale everywhere remains the same, 1.000 (Musayev, 2004). In the UTM projection, the 6⁰-zone cylinder surface cuts along with two secant lines. Moreover, the

scale along the central meridian of the zone is 0.9996 and 1.001 along the section of the ellipsoid (Fig. 4), (NATO STANAG 2211).

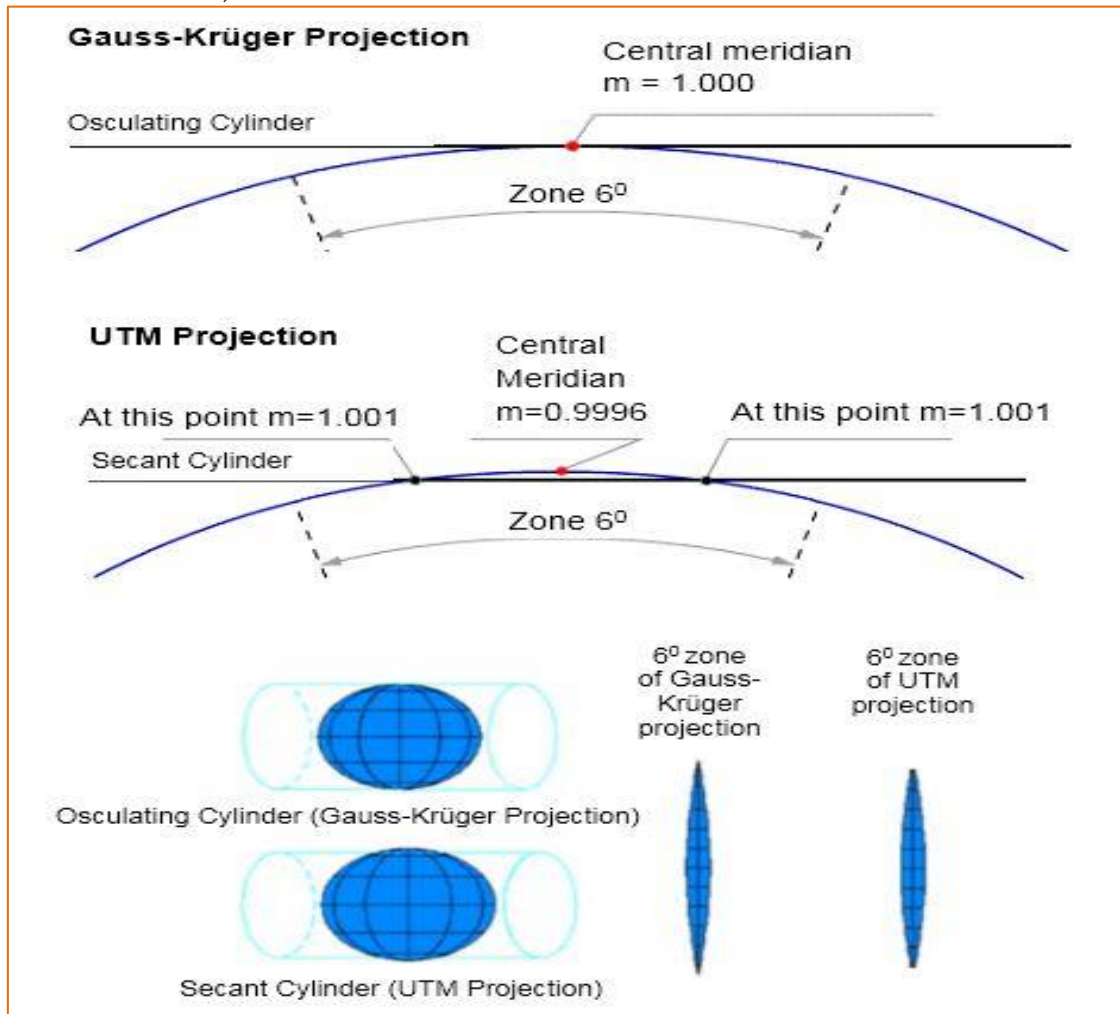


Figure 4. Differences between Gauss-Krüger and UTM projections

But there are some similarities between the Gauss-Krüger projection and the UTM projection. In both projections the Earth's surface is divided into sixty 6° zones, starting from 180° meridian. And each zone is individually projected onto the surface of the cylinder. However, due to the different projection onto the cylinder surface, the scale changes as it approaches or moves away from the middle meridian of the zone (Musayev, 2004). This accordingly affects the difference in the coordinates of the maps to which these projections apply. The difference between the coordinates increases even more towards the poles of the Earth.

5. DIFFERENCES IN A PLANE RECTANGULAR COORDINATE SYSTEMS

The difference in three-dimensional geographic coordinate systems between WGS-84 and SK-42 affects the difference in plane rectangular (topocentric) coordinate systems. This is because the rectangular coordinate system is based on a geographical coordinate system (Fig. 5).

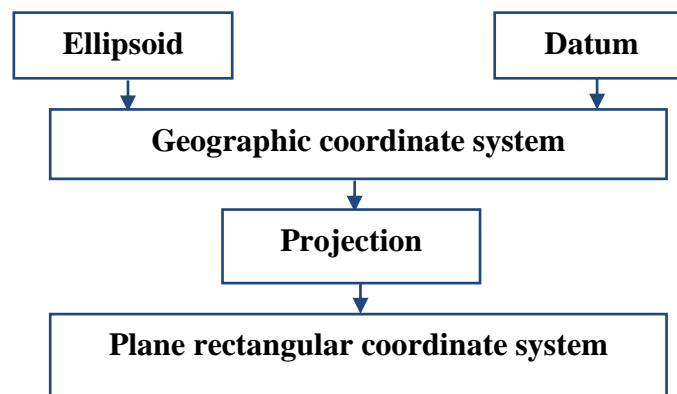


Figure 5. Transition from a geographic coordinate system to a plane rectangular coordinate system

The results of GPS measurements carried out in the field confirm the differences between the plane rectangular coordinates of SK-42 and WGS-84, (Table 2).

Table 2. Measurement results on geodetic points

Geodetic points	Coordinates taken from the catalog (SK-42)	GPS measurement results (WGS-84)	Differences
Koyundag (II class)	4 483 360.86 m N	4 481 487.12 m N	+1 873.74 m
	374 842.34 m E	374 799.30 m E	+43.04 m
Bozdag (II class)	4 473 035.69 m N	4 471 160.73 m N	+1 874.96 m
	382 300.22 m E	382 257.53 m E	+42.69 m
Bayanata (II class)	4 482 211.19 m N	4 480 337.01 m N	+1 874.18 m
	361 884.26 m E	361 839.76 m E	+44.5 m
Sungurdag (II class)	4 484 864.06 m N	4 482 989.86 m N	+1 874.2 m
	352 487.79 m E	352 443.99 m E	+43.8 m

If we intend to connect the coordinates and ellipsoidal height data transmitted by the GPS receiver in the WGS-84 coordinate system to the maps of the SK-42 coordinate system, then we must take into account all of the above mentioned errors. When transferring geodetic and cartographic data from one coordinate system to another, it is more difficult to calculate and apply the projection and orthometric difference in the transformation parameters. While the orthometric height for topographic maps of the SK-42 coordinate system is measured from the mean level of the Baltic Sea, the orthometric height for topographic maps of the WGS-84 coordinate system is measured from the mean level of the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea. The problem is not only that the transformation parameters of these coordinate systems are different, but also that the maps of both coordinate systems have different standards (Table 3).

Table 3. Comparison of topographic map parameters with the WGS and SK-42 coordinate system.

No	Parameters	Maps of the WGS-84 coordinate system	Maps of the SK-42 coordinate system
1	Three-dimensional spatial rectangular coordinate systems (X, Y, Z), (datum)	WGS-84	SK-42
2	Two-dimensional plane rectangular coordinate systems (Topocentric coordinate system - x, y)	WGS-84	SK-42
3	Reference ellipsoid	WGS-84	Ellipsoid of Krassovsky
4	Year of calculation	1984	1940
5	Kartographic projection	UTM (Universal Transverse Merkator)	Gauss-Krüger
6	Topographic symbols	The system of symbols of NATO topographic maps (NATO STANAG's)	The system of symbols of Soviet topographic maps
7	Orthometric height	The average sea level of the Atlantic Ocean's seas and the average sea level of the Mediterranean Sea	The average sea level of the Baltic Sea
8	Division of maps into nomenclature	1:25 000 (7' 30" x 7' 30") 1:50 000 (15' x 15') 1:100 000 (30' x 30') 1:250 000 (1° 30' x 1°)	1:25 000 (7' 30" x 5") 1:50 000 (15' x 10") 1:100 000 (30' x 20") 1:200 000 (1° x 40") 1:500 000 (3° x 2°)
9	Military Grid Reference System	+	-

To avoid a mismatch in the map standards, the countries of Eastern Europe, which after the collapse of the Soviet Union joined to the NATO block, abandoned the SK-42 coordinate system and began to create maps in the WGS-84 coordinate system and by the cartographic standards of this military block.

The Government of the Russian Federation, to eliminate differences between coordinate systems and ensure compliance with international coordinate systems, in 2012 adopted a Decree "On Unified State Coordinate Systems" (Decree of the Government of the Russian Federation 2012, No. 1463). The first paragraph of this resolution indicates the use of the '2011 geodetic coordinate system' (GCS-2011) for geodetic and cartographic issues and the 'Parameters of Earth 1990' geocentric coordinate system (PZ-90) for use in geodetic flight support purposes and solving navigation problems. In 2016, the government issued another Decree 'On the establishment of state coordinate systems, the state altitude system and the state gravimetric system' (Decree of the Government of the Russian Federation 2016, No. 1240). In both decrees, the use of an outdated coordinate system SK-42 is indicated for use with materials (documents) created using them.

6. CONCLUSION

From issues presented above, it is clear that Azerbaijan should abandon the use of SK-42 soon, and adopt internationally recognized coordinate systems and datums such as WGS84 and ITRF (International Terrestrial Reference Frame) for all practical and scientific uses in Azerbaijan. Moreover, it can also be concluded that all technological navigation and surveying systems and computer softwares should be corrected accordingly. Thus, Azerbaijan will be integrated with the modern world in terms of coordinate system and datum.

REFERENCES

- Dave Doyle, *Geoid Height*, <https://mapitgis.com/geoid-height-extension/>, 23 November 2017.
- Decree of the Government of the Russian Federation "On the establishment of the state system of heights and the state gravimetric system", 28 November 2016, No. 1240, Moscow.
- Decree of the Government of the Russian Federation "On Unified State Coordinate Systems", 28 December 2012, No. 1463, Moscow.
- Gennike A., Pobedinsky A., 1999, *Global GPS satellite system and its application in geodesy*, Cartgeocentr – Geoizdat, Moscow, Russia.
- Musayev I., 2004, *Work on NATO topographic maps*, the publishing house of the Ministry of Defense, Baku, Azerbaijan.
- Musayev, I., 2007, "World Geodetic Coordinate System WGS-84", *Journal of Military Knowledge*, No. 5, pp. 39-49.
- NATO STANAG 2211, IGEO, "Geodetic coordinate systems and ellipsoids".
- URL1: Topocentric Coordinate Reference System.
<http://help.digi21.net/SistemasDeReferenciaDeCoordenadasTopocentricos.html>
- Vdovin, V. (2012): The role of coordinate systems in modern geodesy and mine surveying (Роль систем координат в современной геодезии и маркшейдерии) <https://docplayer.ru/29192056-Rol-sistem-koordinat-v-sovremennoy-geodezii-i-marksheyderii-v-c-vdovin.html>, December 2012.



GÜNEŞ ENERJİSİ KOLEKTÖRÜ ÜRETİMİNDE KAYNAK BAĞIMLI GÖREV SÜRELERİ İLE PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME

¹Yakup ATASAGUN , ²Yakup KARA 

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

¹yatasagun@ktun.edu.tr, ²ykara@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 27.10.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 13.01.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, Konya’da faaliyet gösteren ve güneş enerjisi kolektörü üreten bir firmanın montaj hatlarında kaynak bağımlı görev süreleri ile paralel montaj hattı dengeleme uygulaması yapılmıştır. Öncelikle ilgili firmanın montaj hattı tanıtılmış ve kaynak bağımlı görev süreleri ile hat dengeleme yaklaşımını kullanmanın son derece uygun olduğunu göstermek amacıyla montaj hattındaki görevlerin farklı kaynak alternatifleri ile farklı sürelerde tamamlanma seçenekleri ortaya koyulmuştur. Daha sonra, karar vericiler tarafından mevcut montaj hattı ile aynı özelliklere sahip ikinci bir montaj hattının kurulmasına karar verildiği ve yeni kurulacak hattın mevcut hatta paralel bir şekilde yerleştirilerek faaliyet göstereceğinden hareketle bahsi geçen bu iki montaj hattının paralel montaj hattı dengeleme yaklaşımı ile bütünleşik olarak dengelenmesi yapılmıştır. Uygulama sonucu, bahsi geçen firmanın montaj hatlarının, karar vericiler tarafından planlanan çevrim süresi değeri için kaynak bağımlı görev süreleriyle paralel hat dengeleme yaklaşımı kullanılarak bütünleşik olarak dengelenmesinin, hatların birbirinden bağımsız dengelenmesi durumuna kıyasla aylık toplam maliyette % 5,67 oranında bir iyileştirme sağladığı belirlenmiştir. Aynı hatların beş farklı çevrim süresi değeri için dengelenmesiyle yapılan senaryo analizinde de kaynak bağımlı görev süreleriyle paralel hat dengeleme yaklaşımının bağımsız dengeleme yaklaşımına göre toplam maliyeti iyileştirme oranları ortalaması % 8,09 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gerçek hayat uygulaması, Kaynak bağımlı görev süreleriyle montaj hattı dengeleme, Paralel montaj hattı dengeleme, Tamsayı programlama

Parallel Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times in Manufacturing of Solar Energy Collector

ABSTRACT: In this study, the approach of parallel assembly line balancing with resource dependent task times is applied in the assembly lines of a company operating in Konya and producing solar energy collectors. First of all, the assembly line of the relevant company was introduced and the alternatives of completing the tasks in the assembly line using different resources were presented in order to show that it is very convenient to use the approach of assembly line balancing with resource dependent task times. Later, considering that the decision makers decided to establish a second assembly line with the same features as the existing assembly line and the new line will operate by placing it parallel to the existing line, these two assembly lines are balanced using the parallel assembly line balancing approach. As a result of the application, it is determined that the integrated balance of the aforementioned assembly lines using the approach of parallel assembly line balancing with resource dependent task times, provides an improvement of 5.67% in monthly total cost compared to the case of balancing the lines independently, for the cycle time value which is planned by decision makers. In the scenario analysis performed by balancing the same lines for five different cycle time values, the average of the total cost improvement rates of the parallel line balancing approach compared to the independent balancing is obtained as 8.09%

Key Words: *Real life application, assembly line balancing with resource dependent task times, parallel assembly line balancing, integer programming*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir montaj hattı, çevrim süresi olarak ifade edilen kısıtlı bir süre içerisinde, görev adı verilen bir grup montaj operasyonunun yapıldığı belirli sayıda ardışık iş istasyonundan oluşur. Montaj hattı dengeleme (MHD) ise, görevlerin bazı kısıtları ihlal etmeyecek ve bir takım performans ölçütleri en iyilenecek şekilde istasyonlara atanması problemidir. Bu performans ölçütü genellikle bir istasyonda bir işçinin çalışacağı varsayımıyla hattaki toplam istasyon sayısının minimize edilmesidir. Bir MHD probleminin temel kısıtları; (i) her görevin mutlaka ve en fazla bir istasyona atanacağını ifade eden atama kısıtları, (ii) görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin ihlal edilmemesini ifade eden öncelik ilişkileri kısıtları ve (iii) her bir istasyonun iş yükünün, önceden belirlenen çevrim süresini aşmamasını ifade eden çevrim süresi kısıtları şeklinde gruplandırılabilir. Bir istasyonun iş yükü, o istasyona atanan görevlerin görev süreleri toplamı olarak ifade edilir. Çevrim süresi ise MHD problemlerinin ana parametrelerinden birisi olup, ilgili planlama dönemi içerisinde montajı gerçekleştirilecek ürüne olan talebe bağlı olarak belirlenir.

Montaj hatları, hattın şekline göre basit düz ve U-tipi; hatta montajı gerçekleştirilen ürün sayısına göre ise tek modelli ve çok/karma modelli montaj hatları olarak sınıflandırılabilir.

MHD problemlerinin en basit hali, tek modelli düz MHD problemi olarak bilinir. Tek modelli düz MHD problemi, Salveson (1955) tarafından ortaya koyulmuş ve günümüze kadar çok sayıda araştırmacının ilgisini çeken bir problem durumundadır. Düz MHD problemleri ile ilgili literatür oldukça geniş olup Baybars (1986), Ghosh ve Gagnon (1989), Erel ve Sarin (1998), Becker ve Scholl (2006) ve Scholl ve Becker (2006) tarafından yapılan literatür inceleme çalışmaları mevcuttur.

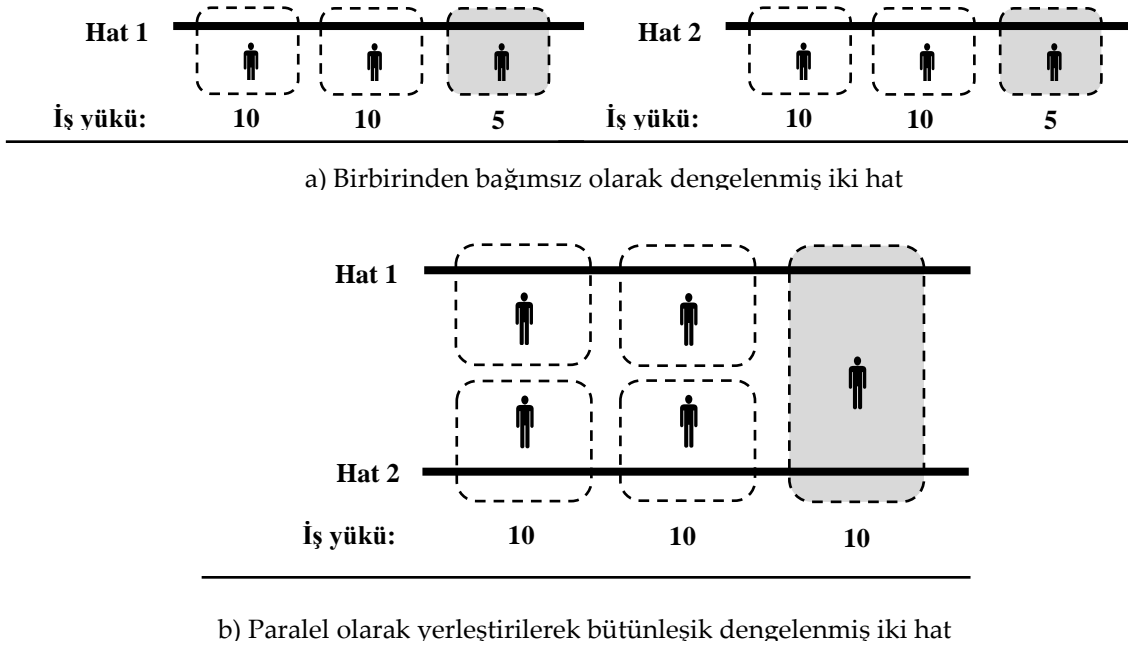
Tek modelli U-tipi MHD problemi ise ilk olarak Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından ortaya koyulmuştur. U-tipi MHD problemine ilişkin literatürde düz MHD problemine kıyasla daha az sayıda çalışma yer almakla birlikte konuya ilgi duyan araştırmacılar Ohno ve Nakade (1997), Urban (1998), Scholl ve Klein (1999), Miltenburg (1998), Sparling ve Miltenburg (1998), Miltenburg (2001), Erel ve diğ. (2001), Guerriero ve Miltenburg (2003), Aase ve diğ. (2004) ve Gökçen ve Ağpak (2006) tarafından yapılan çalışmaları inceleyebilirler. Ayrıca, Battaia ve Dolgui (2013) tarafından yapılan, MHD problemleri ile ilgili olarak özellikle son yıllarda yayınlanan çalışmalara ilişkin çok daha detaylı ve geniş kapsamlı bir literatür inceleme çalışması mevcuttur.

Yukarıda kısaca özetlenmiş olan literatürdeki çalışmalarda düz ve U-tipi montaj hatlarının birbirinden bağımsız olarak dengelenmesi üzerinde durulmuştur. Ancak, bir tesiste birden fazla sayıda montaj hattı bulunduğu durumda bu hatların bütünlük olarak dengelenmesi, tesisteki toplam işgücü ihtiyacının azaltılabilmesi olanağını ortaya çıkarmaktadır (Kara ve diğ. 2010). Gökçen ve diğ. (2006), iki veya daha fazla montaj hattının birbirine paralel olarak yerleştirilebileceğini ve bu hatların bütünlük olarak dengelenebileceğini belirtmişlerdir. Paralel hatların bütünlük olarak dengelenmesi, komşu hatların her ikisinden de görevler içeren ortak istasyonlar ortaya çıkmasına neden olacaktır. Bu ortak istasyonlar sayesinde, istasyon boş zamanlarının ve tesisteki toplam istasyon sayısının minimize edilmesi açısından önemli bir esneklik sağlanmış olacaktır (Kara ve diğ. 2010; Gökçen ve diğ. 2006). Şekil 1'de paralel montaj hattı dengeleme yaklaşımının sağlayacağı avantaja bir örnek gösterilmiştir. Şekil 1.a'da 10 dakikalık çevrim süresi için birbirinden bağımsız olarak dengelenmiş iki adet hat bulunmaktadır. Şekilden anlaşılacağı üzere her iki hatta da tam dolu iki istasyon bulunurken birer adet de iş yükü 5 dakika olan istasyon bulunmaktadır. Bu hatların birbirinden bağımsız dengelendiği düşünülürse toplamda 6 istasyona ihtiyaç duyulacaktır. Şekil 1.b'de ise bu hatların paralel montaj hattı dengeleme yaklaşımıyla bütünlük dengelenmiş hali görülmektedir. Bu durumda hatların üçüncü istasyonları ortak bir istasyon olarak birleştirilebilecek, böylece ihtiyaç duyulacak toplam istasyon sayısı 5'e düşecektir.

Gökçen ve diğ. (2006) tarafından, paralel montaj hatlarının dengelenmesi için tesisteki toplam istasyon sayısını minimize edecek 0-1 tamsayılı bir matematiksel model ve bir sezgisel çözüm yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu matematiksel model ile çözülen 95 test probleminin 65'inde, paralel dengeleme yaklaşımının,

hatların bağımsız dengelenmesi durumuna göre daha az sayıda istasyon gerektiren sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Ayrıca, MHD literatüründe tek modelli ve karma modelli U-tipi hatların paralel dengelenmesi gibi MHD probleminin farklı türleri için paralel dengeleme yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalar (Kucukkoc ve Zhang, 2015; Kucukkoc ve Zhang, 2017) mevcut olmakla birlikte Aguilar ve diğ. (2020) tarafından paralel montaj hatlarının dengelenmesi problemine yönelik detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır.



Şekil 1. Paralel montaj hattı dengeleme yaklaşımı

Figure 1. The approach of parallel assembly line balancing

Diğer taraftan, basit düz ve U-tipi MHD yaklaşımlarında görevlerin tamamlanma zamanları genellikle sabit kabul edilmektedir. Ancak, görevleri farklı kaynak alternatifleri (ekipman veya yardımcı işçi vb.) ile farklı sürelerde tamamlamanın mümkün olması durumunda bu yaklaşım yeterince esnek ve etkili olmamaktadır. Montaj hatlarında dengeleme esnekliği sağlamak amacıyla farklı kaynaklardan oluşan farklı işlem alternatifleri kullanılarak görevlerin süreleri kısaltılabilir. Buna ilave olarak, düz ve U-tipi montaj hatları üzerine yapılan çalışmaların birçoğunda bir istasyonda bir işçinin çalışacağı varsayımı bulunmaktadır. Ancak, uygulamada bazı görevler yalnızca bir işçi tarafından gerçekleştirilememektedir. Bazı görevler, montajlanacak parçanın boyutu vb. sebeplerle mutlaka yardımcı bir işçinin (asistan) desteğini gerektireceği gibi, bir işçi tarafından yapılabilecek bazı görevlerin süreleri de bir asistanın yardımı ile kısalabilmektedir. Bu gibi durumlarda, hat dengeleme çalışmaları yapılırken farklı işlem alternatiflerinin (kaynak kombinasyonları) dikkate alınması gerekmektedir (Kara ve diğ. 2011).

Faaland ve diğ. (1992) bu problemi, kaynak bağımlı montaj hattı dengeleme (KBMHD) olarak adlandırılmışlar ve bir istasyondaki bir görevin tamamlanma zamanının o istasyonda kullanılan işlem alternatifine bağlı olacağını belirtmişlerdir. Bir işlem alternatifi, işçiler, asistanlar ve ekipmanlardan oluşan bir kaynaklar kümesidir. Her işlem alternatifinin belirli bir maliyeti vardır ve daha yüksek maliyetli işlem alternatifleri tercih edildiğinde görev süreleri daha fazla kısalmaktadır. Faaland ve diğ.'nin (1992) çalışmasında, hat boyunca açılan istasyonların sabit maliyetleri ile istasyonlara atanan işlem alternatiflerinin maliyetlerinden oluşan toplam maliyet minimize edilmeye çalışılmıştır (Kara ve diğ. 2011).

Kara ve diğ. (2011), birçok firmadaki MHD problemlerinin tamamına yakınının KBMHD olarak ele alınabileceğini ifade ettikleri çalışmalarında, problemi, uygulamaya yönelik bir takım yeni varsayımlarla

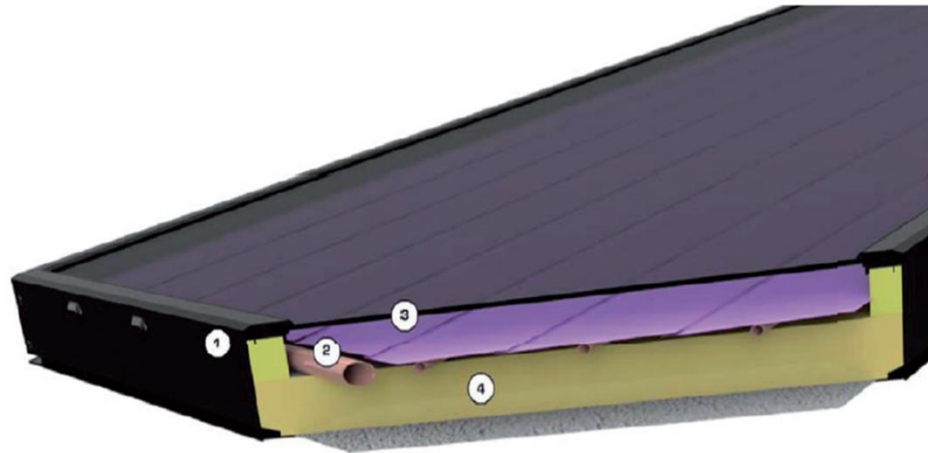
daha geniş bir bakış açısıyla ele almışlar ve KBMHD yaklaşımını U-tipi montaj hatlarına uyarlamışlardır (KBUMHD). KBUMHD yaklaşımıyla dengelenen U-tipi hatların toplam maliyetinin KBMHD yaklaşımıyla dengelenen düz hatlara göre ortalama %5,24 daha düşük olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kara ve Atasagun (2013), Kara ve diğ. (2011) tarafından önerilen KBMHD yaklaşımını Gökçen ve diğ. (2006) tarafından ortaya koyulan paralel montaj hattı dengeleme problemine uyarlamışlar ve bu probleme Kaynak Bağımlı Görev Süreleriyle Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (KBMHD_P) adını vermişlerdir. KBMHD_P için bir 0-1 tamsayı doğrusal matematiksel model geliştirmişler ve matematiksel modeli örnek bir problem üzerinde doğrularak, örnek problemin farklı çevrim süreleriyle çözümlerinden oluşan bir senaryo analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu senaryo analizine göre, paralel iki hattın önerilen KBMHD_P yaklaşımıyla bütünleşik olarak dengelenmesinin, dört farklı çevrim süresi değerinin üçünde hatların KBMHD yaklaşımı ile bağımsız dengelenmesi durumuna göre daha düşük maliyetli sonuç verdiği görülmektedir ve KBMHD_P yaklaşımının bağımsız dengelemeye göre toplam maliyeti iyileştirme oranları ortalaması ise % 8,8 olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada, Kara ve Atasagun (2013) tarafından önerilen matematiksel model kullanılarak Konya'da faaliyet gösteren ve güneş enerjisi kolektörü üreten bir firmanın montaj hattında yapılan, kaynak bağımlı görev süreleriyle paralel montaj hattı dengeleme uygulaması anlatılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında öncelikle çalışma kapsamında ele alınan esas materyali teşkil eden montaj hatları tanımlanmış ve uygulama kapsamında ele alınan probleme ilişkin diğer parametreler verilmiştir. Devamında uygulama sonucu elde edilen sayısal bulgular ortaya koyularak bu bulguların tartışılması ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili öneriler sunulmuştur. Çalışmanın ek açıklamalar bölümünde ise, bahsi geçen uygulamada kullanılan matematiksel model, varsayımları ve kısaltmaları ile birlikte verilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma kapsamında ele alınan ürün (güneş enerjisi kolektörü) yaklaşık 2 m × 1 m boyutlarında olup, Şekil 2'de görülebileceği gibi, alüminyum kasa, bakır panel, cam ve izolasyon malzemesi olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Ürünün montaj hattında ise 19 görev bulunmaktadır. Bu görevlerin tanımları ve aralarındaki öncelik ilişkileri ise Çizelge 1'de gösterilmiştir.



- | | |
|------------------|-----------------------|
| ① Alüminyum Kasa | ③ Cam |
| ② Panel | ④ İzolasyon Malzemesi |

Şekil 2. Güneş enerjisi kolektörü

Figure 2. Solar energy collector

Çizelge 1. Güneş Enerjisi Kolektörü Montaj Hattı Görev Tanımları ve Öncelik İlişkileri*Table 1. Task definitions and precedence relations of the solar energy collector assembly line*

Görev No	Öncül Görev	Görev Tanımı
1	-	Uzun ve kısa profilleri birleştirme
2	1	Matkapla profilin 4 başına 8 adet delik delme
3	2	Profilin 4 başına 8 adet perçin takma
4	3	Profilin 4 başına çekiçle vurup oturtma ve 4 köşesini bezle silme
5	3	Gergi çubuğu deliği delme
6	5	Kasanın içini solventle silme
7	6	Profilin iç kısmına çift taraflı bant çekme
8	7	Taban sacı döşeme, çift taraflı bant kâğıdını çekme ve taban sacını bastırma
9	8	Kasaya silikon çekme
10	9	Cam yünü / taş yünü yerleştirme
11	10	Gergi çubuğu takma
12	11	Paneli kasaya takma
13	12	4 adet conta takma ve düzeltme
14	13	Panel temizleme ve panel rötuş
15	14	Cam yerleştirme
16	15	Cam fitiline silikon çekme
17	4,16	Çıta çakma
18	17	Genel temizlik ve etiketleme ile kasa köşe düzeltme ve boyama
19	18	Kartonlama

Çizelge 1’de verilen görevlerden 15 numaralı cam yerleştirme görevi, kaynak bağımlı görev süreleri yaklaşımına çok iyi bir örnek teşkil etmektedir. Yerleştirilen cam bir kişinin rahatlıkla kavramasına ve yerleştirmesine engel teşkil edecek şekilde geniş ve ağır bir malzemedir. Bu nedenle bu görevi yapacak olan işçi, görevin manuel olarak yapılması durumunda mutlaka bir asistanın yardımına ihtiyaç duymakta ve bu şekilde bu görev 16 saniye sürmektedir. Alternatif olarak, bu görevin yapılması sırasında bir vakumlu tutucu kullanılabilir. Vakumlu tutucuyu bir işçi tek başına kontrol edebilmekte ve bu durumda asistan yardımına ihtiyaç kalmadan görev 9 saniyede tamamlanmaktadır. Bu durumda ise kullanılacak olan vakumlu tutucu fazladan bir işletme maliyetine neden olacaktır. Benzer şekilde 10 numaralı görev olan cam yünü / taş yünü yerleştirme görevi manuel olarak yapılması gereken bir görevdir ve bir işçi tarafından 160 saniyede yapılmaktadır. Ürün iki kişinin aynı anda çalışması için yeterince büyük olduğundan ve bu görev fazla uzmanlık gerektirmediğinden bir asistan yardımıyla görev süresi 80 saniyeye düşülebilmektedir. Montaj hattındaki görevlerin tamamına yakını 10 numaralı görev örneğinde olduğu gibi bir asistan yardımıyla görev süresi yarıya düşürülebilecek görevlerdir. Bu durumda, bu montaj hattı için en iyi çözümün elde edilebilmesi için KBMHD yaklaşımının kullanılması kaçınılmazdır.

Çizelge 2’de bahsi geçen güneş enerjisi kolektörü montaj hattındaki görevlerin süreleri saniye cinsinden gösterilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde, 1 numaralı görevin herhangi bir ekipman kullanılmadan ve asistan yardımı olmadan 50 saniyede, yine ekipman kullanılmadan asistan yardımıyla 25 saniyede tamamlanabildiği görülmektedir. Bu görev için 1 veya 2 numaralı ekipmanlardan herhangi birinin kullanılması söz konusu değildir. Benzer şekilde 6 numaralı görev için de ekipman kullanımı söz konusu olmamakla birlikte bu görevde bir asistan işçinin yardım etmesi durumu da söz konusu değildir. 6 numaralı görevin yalnızca ekipmansız ve asistan yardımı olmadan yerine getirilme alternatifi bulunmaktadır ve bu durumda 10 saniye sürmektedir. Yine çizelgede görülebileceği gibi 12 numaralı

görevin yalnızca “Asistan” sütununun “Evet” olduğu ve “Ekipman” sütununun “Yok” şeklinde belirtildiği durum için görev süresi verilmiştir. Bu durum, 12 numaralı görevin ekipman kullanmadan ve mutlaka bir asistan yardımıyla gerçekleştirilme alternatifi olduğunu ve bu durumda görev süresinin 20 saniye olduğunu göstermektedir. Özetle, Çizelge 2’nin herhangi bir hücresinde görev süresi belirtilmemiş olması, ilgili görevin ilgili hücredeki kaynak alternatifi ile gerçekleştirilemeyeceğini göstermektedir. Bu durumda ilgili problemin matematiksel model kullanılarak çözülmek istenmesi durumunda, bir görevin gerçekleştirilme ihtimalinin olmadığı bir kaynak alternatifine karşılık gelen karar değişkenlerinin modelde hiç tanımlanmaması ya da tanımlansa bile bu değişkenlerin değerlerinin sıfıra eşitleneceği kısıtlar ilave edilmesi gibi seçenekler değerlendirilebilir. Bu çalışmada, çözüm süresi açısından avantaj sağlayacağı düşünüldük bir görevin gerçekleştirilme ihtimalinin olmadığı bir kaynak alternatifine karşılık gelen karar değişkenlerinin tanımlanmaması yolu tercih edilmiştir.

Ayrıca, yukarıda da bahsedildiği gibi Çizelge 2’deki 6, 14 ve 17 numaralı görevler dışındaki tüm görevlerin KBMHD yaklaşımının varsayımlarıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 2. Güneş Enerjisi Kolektörü Montaj Hattı Görev Süreleri (sn)

Table 2. Task completion times of the solar energy collector assembly line (s)

Görev No	Görev Süreleri			Görev No	Görev Süreleri		
	Asistan	Ekipman			Asistan	Ekipman	
		Yok	1			2	Yok
1	Evet	25		11	Evet	40	
	Hayır	50			Hayır	80	
2	Evet	25		12	Evet	20	
	Hayır	50			Hayır		
3	Evet	30		13	Evet	30	
	Hayır	60			Hayır	60	
4	Evet	30		14	Evet		
	Hayır	60			Hayır	26	
5	Evet	10		15	Evet	16	
	Hayır	20			Hayır		9
6	Evet			16	Evet		
	Hayır	10			Hayır	30	15
7	Evet	37		17	Evet		
	Hayır	74			Hayır	90	
8	Evet	40		18	Evet	40	
	Hayır	80			Hayır		
9	Evet			19	Evet	90	
	Hayır	30	15		Hayır		
10	Evet	80					
	Hayır	160					

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle de güneş enerjisi kullanımına ilginin artmasıyla birlikte bahsi geçen firmanın üretmekte olduğu güneş enerjisi kolektörünün talebinde de ciddi bir artış meydana gelmiş ve güncel talep firmanın üretim kapasitesinin üzerine çıkmıştır. Bu durumda karar vericiler, mevcut montaj hattı ile aynı özelliklere sahip (özdeş) ikinci bir montaj hattı kurmaya karar vermişlerdir. Yeni kurulacak montaj hattı, tesis içerisinde mevcut hatta paralel bir şekilde

yerleştirilecektir. Bu durumda, yukarıda anlatılan KBMHD_P yaklaşımını kullanmanın sunmuş olduğu olanak ve avantajlardan yararlanabilmek için son derece uygun bir üretim sistemi karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, birbiriyle aynı özellikte iki montaj hattı kurularak ve bu hatların birbirine paralel bir şekilde konumlandırılarak bütünleşik olarak dengelenmesi, paralel hat dengeleme yaklaşımının yukarıda bahsedilen avantajlarının yanı sıra, hatlardan herhangi birinde bir sorun ortaya çıksa bile üretimin diğer hat üzerinden devam ettirilerek kesintiye uğramaması gibi bir avantajı da beraberinde getirmektedir.

Mevcut talep durumu ve firmanın çalışma saatleri de dikkate alınarak, karar vericiler tarafından, birbirine paralel yerleştirilecek montaj hatlarının her ikisinin de 135 saniyelik çevrim süresi ile çalışacağı düşünülmektedir. Farklı uygulamalarda paralel yerleştirilmiş hatların çevrim süreleri farklılık gösterebilir. Bu durumda Gökçen ve diğ. (2006) tarafından önerilen çevrim süresi ayarlama yaklaşımı kullanılabilir. Bahsi geçen iki montaj hattı özdeş hatlar olduğu için, Çizelge 1’de verilen görev tanımları ve öncelik ilişkileri ile Çizelge 2’de verilen kaynak alternatifleri ve görev süreleri her iki hat için de geçerlidir. Bu durumda bahsi geçen firmada karşımıza çıkan problem, paralel yerleştirilmiş özdeş iki montaj hattının KBMHD_P yaklaşımıyla, aylık toplam maliyeti en küçükleyecek şekilde dengelenmesidir. Probleme ilişkin diğer parametreler ise şöyledir:

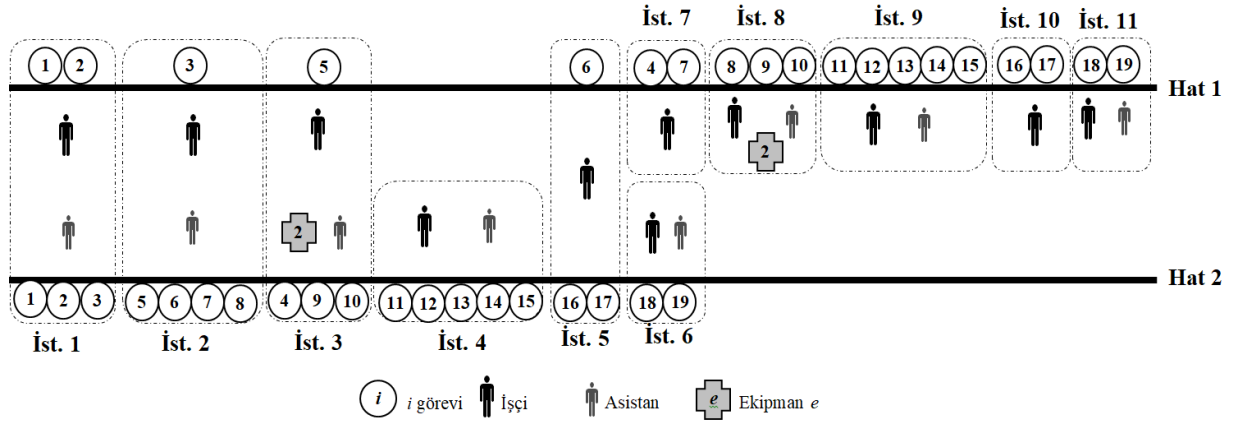
- Bir istasyon açmanın aylık maliyeti (c_w) : 5.000 TL
- Bir asistanın aylık işçilik maliyeti (c_a) : 3.500 TL
- 1 numaralı ekipmanın aylık işletme maliyeti (c_1) : 2.000 TL
- 2 numaralı ekipmanın aylık işletme maliyeti (c_2) : 100 TL
- Kullanılabilir asistan sayısı (NA) : 15 adet
- 1 numaralı ekipmanın kullanılabilir miktarı (NE_1) : 2 adet
- 2 numaralı ekipmanın kullanılabilir miktarı (NE_2) : 4 adet

Her ne kadar bahsi geçen firmanın montaj hatlarının 135 saniyelik çevrim süresiyle çalışacağı ifade edilse de, zaman içerisinde talepte meydana gelecek dalgalanmalara bağlı olarak hatların farklı bir çevrim süresi ile işletilmesi ihtiyacı ortaya çıkabilecektir. Bu durumu da göz önüne alarak bahsi geçen iki montaj hattının beş farklı çevrim süresi için, birbirinden bağımsız şekilde dengelenmeleri durumu ile KBMHD_P yaklaşımı kullanılarak paralel dengelenme durumlarının karşılaştırıldığı bir senaryo analizi de gerçekleştirilmiş ve senaryo analizinin sonuçları da çalışmanın ilerleyen bölümlerinde gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında ele alınan problem ile senaryo analizinde yer verilen problemlerin çözümünde Kara ve Atasagun (2013) tarafından önerilen matematiksel model kullanılmıştır. Bahsi geçen matematiksel modele bu çalışmanın Ek Açıklamalar bölümünde yer verilmiştir. Matematiksel modelin çözümleri ise Intel Xeon E5-1650 (6 çekirdek) 3,2 Ghz CPU ve 16 Gb RAM’e sahip bir kişisel bilgisayarda CPLEX v12.5 çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

UYGULAMA SONUÇLARI (APPLICATION RESULTS)

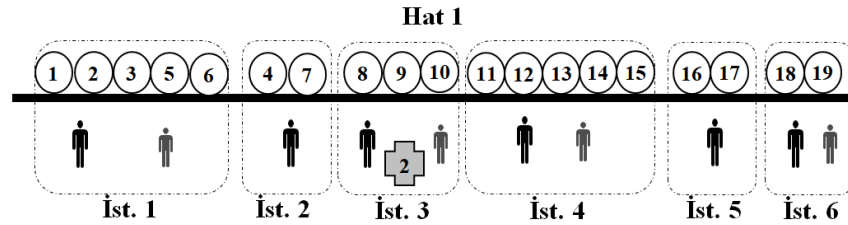
Bu bölümde çalışma kapsamında ele alınan problemin Kara ve Atasagun (2013) tarafından önerilen matematiksel model ile çözümü ve ilgili problemin beş farklı çevrim süresi için çözülmesi şeklinde gerçekleştirilen senaryo analizinin sonuçlarına yer verilmiştir. Bahsi geçen problemin optimal çözümü Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarının KBMHD_P yaklaşımı ile paralel dengeleme sonucu
Figure 3. Parallel balancing result of the solar energy collector assembly lines using KBMHD_P approach

Şekil 3 incelendiğinde optimal çözümde toplam on bir adet istasyon açıldığı, bu istasyonların sekiz adedine asistan ataması yapıldığı ve toplam iki adet 2 numaralı ekipman kullanıldığı görülmektedir. Bu durumda istasyon açmanın toplam maliyeti 55.000 TL (11×5.000), asistanların toplam işçilik maliyeti 28.000 TL (8×3.500), kullanılan ekipmanların toplam işletme maliyeti ise 200 TL (2×100) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda, optimal çözümde, aylık toplam maliyet 83.200 TL olarak elde edilmiştir.

Bahsi geçen güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarının paralel dengeleme yaklaşımı kullanılmadan birbirinden bağımsız dengelenmesi durumuna örnek teşkil etmek üzere bu hatlardan yalnızca birinin KBMHD yaklaşımıyla dengelenmesi ile sonucu ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan iki hat özdeş hatlar olduğu için hatların birbirinden bağımsız dengelenmesi durumunda Şekil 4'te gösterilen dengeleme sonucu her iki hat için de geçerli olacaktır.



Şekil 4. Güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarından birinin KBMHD yaklaşımı ile dengeleme sonucu
Figure 4. Balancing result for one of the solar energy collector assembly lines using KBMHD approach

Şekil 4'teki optimal atama sonuçlarına göre uygulama yapılan firmadaki güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarının her biri KBMHD yaklaşımıyla birbirinden bağımsız olarak dengelendiğinde, tesiste aynı özellikte iki hat faaliyet göstereceğinden, her bir hatta altışar adet olmak üzere toplamda on iki adet istasyon açılacağı, her bir hatta dörder adet olmak üzere toplamda sekiz adet asistan ataması yapılacağı ve her bir hatta birer adet olmak üzere toplamda iki adet 2 numaralı ekipmanın kullanılacağı görülmektedir. Bu durumda aylık toplam maliyet her bir hat için 44.100 TL olmak üzere toplamda 88.200 TL olarak karşımıza çıkacaktır. Bahsi geçen iki montaj hattı KBMHD_P yaklaşımıyla bütünlük olarak dengelendiğinde paralel dengeleme yaklaşımının bir sonucu olarak toplam istasyon sayısında bir adetlik bir azalma meydana gelmiş ve toplam maliyet 83.200 TL olarak karşımıza çıkmıştır. Bu durumda bahsi geçen güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarının KBMHD_P yaklaşımıyla dengelenmesi durumunda, hatların birbirinden bağımsız olarak dengelenmesi durumuna göre aylık toplam maliyette yaklaşık %5,67 oranında bir iyileştirme ortaya çıkacaktır.

Bahsi geçen iki montaj hattının 120, 135, 150, 165 ve 180 saniye olmak üzere beş farklı çevrim süresi için, birbirinden bağımsız şekilde dengelenmeleri durumu ile KBMHD_P yaklaşımı kullanılarak paralel

dengeleme durumlarının karşılaştırıldığı senaryo analizi ise ilgili problemlerin saniye cinsinden çözüm süreleri ile birlikte Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Farklı Çevrim Süreleriyle Senaryo Analizi

Table 3. A scenario analysis with different cycle time values

Çevrim Süresi (sn)	Dengeleme Yaklaşımı	CPU Süresi (sn)	İstasyon Sayısı	Asistan Sayısı	Ekipman 1 Sayısı	Ekipman 2 Sayısı	Toplam Maliyet	İyileşme Oranı
120	Bağımsız	15,47	14	12	-	-	112.000	
	Paralel	7.933,92	13	10	-	-	100.000	% 10,71
135	Bağımsız	37,16	12	8	-	2	88.200	
	Paralel	77.305,28	11	8	-	2	83.200	% 5,67
150	Bağımsız	3,38	10	8	-	2	78.200	
	Paralel	623,42	10	7	1	2	76.700	% 1,92
165	Bağımsız	1.854,27	10	8	-	-	78.000	
	Paralel	8,31	9	7	-	3	69.800	% 10,51
180	Bağımsız	3,09	10	6	-	2	71.200	
	Paralel	121,34	9	5	-	4	62.900	% 11,66
ORTALAMA								% 8,09

Çizelge 3'te görülebileceği gibi hatların bağımsız dengelenmeleri durumunda optimal çözümü elde etmek için gereken CPU süreleri, aynı çevrim süresi değeri için hatların paralel dengeleme yaklaşımıyla dengelenmesi durumu için gereken CPU sürelerinden ciddi şekilde düşüktür. Bunun nedeni, daha önce de ifade edildiği gibi sistemde iki adet özdeş hat yer aldığından ve bağımsız dengeleme durumu için çözümlerin yalnızca hatlardan birisi için yapılmasının yeterli olacağından, aynı çözümün diğer hat için de aynen geçerli olacağından hareketle yalnızca tek bir hat için çözüm yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Hatların paralel dengelenmesi durumunda ise matematiksel model ile iki hat eş zamanlı olarak dengelenmeye çalışılmakta, bu durumda problem boyutu yaklaşık iki katına çıkmakta, ayrıca her iki hattın da görevler içeren ortak istasyonlar açılması, bazı kaynak alternatiflerinin bu istasyonlarda her iki hat tarafından ortak kullanılmasına imkân sağlanması gibi durumlar da düşünüldüğünde problem daha zor ve karmaşık bir hale gelmektedir. Bu nedenle paralel dengeleme durumu için CPU sürelerinin daha yüksek olması beklenen bir durumdur.

Buradan hareketle, Çizelge 3'te her bir çevrim süresi değeri için bağımsız dengeleme yaklaşımı satırlarında verilen istasyon sayısı, asistan sayısı, ekipmanların kullanılan miktarları ve toplam maliyet değerleri, üretim ortamında özdeş iki hat faaliyet göstereceği göz önüne alınarak, iki hattın birbirinden bağımsız dengelenmesi durumunda iki hatta ortaya çıkacak olan toplam sayı ve değerler şeklinde verilmiştir. Çizelge 3'ün "İyileşme Oranı" başlıklı sütununda ise her bir çevrim süresi değeri için, hatların birbirinden bağımsız dengelenmesi yerine paralel dengeleme yaklaşımıyla dengelenmesi durumunda toplam maliyette meydana gelecek iyileşmenin bağımsız dengeleme durumundaki toplam maliyete oranları verilmiştir. İyileşme oranı her bir çevrim süresi değeri için eşitlik (1) e göre hesaplanmıştır.

$$\dot{I}O = \frac{TM_{Bağımsız} - TM_{Paralel}}{TM_{Bağımsız}} \times 100 \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de $\dot{I}O$, iyileşme oranını; $TM_{Bağımsız}$, bağımsız dengeleme durumundaki toplam maliyeti; $TM_{Paralel}$ ise paralel dengeleme durumundaki toplam maliyeti ifade etmektedir.

Çizelge 3 incelendiğinde, bahsi geçen hatların KBMHD_P yaklaşımıyla paralel olarak dengelenmesi durumunda 135 saniyelik çevrim süresi için yukarıda da anlatıldığı gibi bağımsız dengelemeye göre yalnızca istasyon sayısında bir azalma ortaya çıkarak daha düşük maliyetli sonuç elde edildiği görülmektedir. 135 saniye dışındaki diğer dört çevrim süresi değeri için yapılan çözümlerde ise asistan ve ekipmanlar gibi kaynak alternatiflerinin kullanılan miktarlarında da farklılık ortaya çıkacak şekilde

KMBHD_P yaklaşımıyla paralel dengelemenin bağımsız dengelemeye göre daha düşük toplam maliyete sahip sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durum, paralel dengeleme yaklaşımının sağlamış olduğu avantajların, kaynak bağımlı görev süreleri ile montaj hattı dengeleme problemi için de geçerli olduğunun önemli bir göstergesidir. Çizelge 3'te gösterilen ve senaryo analizi kapsamında değerlendirmeye alınan beş farklı çevrim süresi değeri için KBMHD_P yaklaşımıyla paralel dengelemenin bağımsız dengeleme durumuna göre iyileştirme oranları ortalaması ise % 8,09 olarak ortaya çıkmıştır.

SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULTS and SUGGESTIONS)

Bu çalışmada, paralel montaj hatlarının kaynak bağımlı görev süreleriyle dengelenmesi problemi için Kara ve Atasagun (2013) tarafından geliştirilen matematiksel model kullanılarak Konya'da faaliyet gösteren ve güneş enerjisi kolektörü üreten bir firmanın üretim ortamındaki, kaynak bağımlı görev sürelerine sahip ve birbirine paralel olarak yerleştirilerek faaliyet gösterecek özdeş iki montaj hattının dengelenmesi yapılmıştır. Dengeleme sonucu, bahsi geçen güneş enerjisi kolektörü montaj hatlarının, karar vericilerin planladığı 135 saniyelik çevrim süresi için KBMHD_P yaklaşımıyla dengelenmesi durumunda, hatların birbirinden bağımsız olarak dengelenmesi durumuna göre aylık toplam maliyette yaklaşık % 5,67 oranında bir iyileştirme ortaya çıkacağı görülmüştür.

Ayrıca beş farklı çevrim süresi değeri için yapılan senaryo analizi sonucunda da, paralel dengeleme yaklaşımını tercih etmenin, bağımsız dengeleme durumuna göre aylık toplam maliyeti iyileştirme oranları ortalaması % 8,09 olarak elde edilmiştir.

Bu durum, tam zamanında üretim felsefesinin en önemli bileşenlerinden birisi olan, üretim ortamındaki her türlü israfın elimine edilmesi ilkesiyle de uyum göstermesi açısından son derece önemlidir.

Konu ile ilgili gelecekte yapılacak çalışmalarda, KBMHD_P problemi için çok kısa sürelerde etkin çözümler üretecek sezgisel yaklaşımlar geliştirilmesi ve karar vericilerin kendi üretim ortamlarına özgü bir takım tercih ve öncelikleri konusunda esneklik sağlayacak hedef programlama yaklaşımlarının önerilmesi üzerinde durulabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aase, G.R., Olson, J.R., Schniederjans, M.J., 2004, "U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: an experimental study", *European Journal of Operational Research*, 156 (3), 698-711.
- Aguilar, H., García-Villoria, A., Pastor, R., 2020, "A survey of the parallel assembly lines balancing problem", *Computers and Operations Research*, 124, 105061.
- Battaia, O., Dolgui, A., 2013, "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches", *International Journal of Production Economics*, 142 (2), 259-277.
- Baybars, I., 1986, "A Survey of Exact Algorithms for the Simple Line Balancing Problem", *Management Science*, 32 (8), 909-932
- Becker, C., Scholl, A., 2006, "A survey on problems and methods in generalised assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 168 (3), 694-715.
- Erel, E., Sarin, S.C., 1998, "A survey of the assembly line balancing procedures", *Production Planning and Control*, 9 (5), 414-434.
- Erel, E., Sabuncuoglu, I., Aksu, B.A., 2001, "Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing", *International Journal of Production Research*, 39 (13), 3003-3015.
- Faaland, B.H., Klatorin, T. D., Schmitt, T. G., Shtub, A., 1992, "Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times", *Decision Sciences*, 23 (2), 343-364.
- Ghosh, S., Gagnon, J., 1989, "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems", *International Journal of Production Research*, 27 (4), 637-670.
- Gökçen, H., Ağpak, K., 2006, "A goal programming approach to simple U-line balancing problem", *European Journal of Operational Research*, 171 (2), 577-585.

- Gökçen, H., Ağkak, K., Benzer, R., 2006, "Balancing of parallel assembly lines", *International Journal of Production Economics*, 103 (2), 600-609.
- Guerriero, F., Miltenburg, J., 2003, "The stochastic U-line balancing problem", *Naval Research Logistics* 50 (1), 31-57.
- Kara, Y., Atasagun, Y., 2013, "Assembly Line Balancing with Resource Dependent Task Times: An Application to Parallel Assembly Lines", *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM '2013)*, June 19-21, Saint Petersburg, RUSSIA, 875-880.
- Kara, Y., Gökçen, H., Atasagun, Y., 2010, "Balancing Parallel Assembly Lines with Precise and Fuzzy Goals", *International Journal of Production Research*, 48 (6), 1685-1703.
- Kara, Y., Özgüven, C., Yalçın, N., Atasagun, Y., 2011, "Balancing Straight and U-Shaped Assembly Lines with Resource Dependent Task Times", *International Journal of Production Research*, 49 (21), 6387-6405.
- Kucukkoc, I., Zhang, D.Z., 2015, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines", *Computers & Operations Research*, 64, 233-244.
- Kucukkoc, I., Zhang, D.Z., 2017, "Balancing of mixed-model parallel U-shaped assembly lines considering model sequences", *International Journal of Production Research*, 55 (20), 5958-5975.
- Miltenburg, J., 1998, "Balancing U-lines in a multiple U-line facility", *European Journal of Operational Research*, 109 (1), 1-23.
- Miltenburg, J., 2001, "U-shaped production lines: A review of theory and practice", *International Journal of Production Economics*, 70 (3), 201-214.
- Miltenburg, J., Wijngaard, J., 1994, "The U-line line balancing problem", *Management Science*, 40 (10), 1378-1388.
- Ohno, K., Nakade, K., 1997, "Analysis and optimization of U-shaped production line", *Journal of the Operations Research Society of Japan* 40 (1), 90-104.
- Salveson, M.E., 1955, "The assembly line balancing problem", *Journal of Industrial Engineering*, 6 (3), 18-25.
- Scholl, A., Becker, C., 2006, "State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing", *European Journal of Operational Research*, 168 (3), 666-693.
- Scholl, A., Klein, R., 1999, "ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines", *International Journal of Production Research*, 37 (4), 721-736.
- Sparling, D., Miltenburg, J., 1998, "The mixed-model U-line balancing problem", *International Journal of Production Research* 36 (2), 485-501.
- Urban, T.L., 1998, "Optimal balancing of U-shaped assembly lines", *Management Science*, 44 (5), 738-741.

EK AÇIKLAMALAR (APPENDIX)

Bu bölümde Kara ve Atasagun (2013) tarafından KBMHD_P için geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Matematiksel model, Kara vd. (2011) tarafından önerilen KBMHD yaklaşımının varsayımları ile Gökçen vd. (2006) tarafından önerilen paralel montaj hattı dengeleme yaklaşımının varsayımlarına sadık kalınarak geliştirilmiştir.

Varsayımlar (Assumptions)

Matematiksel modelin varsayımları şu şekildedir:

- Üretim yapılan tesiste birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki veya daha fazla montaj hattı vardır.
- Her bir hatta tek bir ürünün montajı yapılmaktadır.
- Her bir ürünün görevleri arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- Görev süreleri deterministiktir ancak görevin yapılması için tahsis edilmiş kaynaklara (ekipman türü veya asistan) bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bir görevin süresi, görevin atandığı istasyondan bağımsızdır.
- Bir görev, öncelik ilişkilerini ihlal etmeyecek şekilde herhangi bir istasyona atanabilir.

- Bazı görevleri bir işçi tek başına yapamaz. Bir istasyona böyle bir görev atanmış ise mutlaka bir de asistan atanmalıdır.
- Bazı görevlerin süreleri bir asistanın yardımı ile kısalabilir.
- Bazı görevlerin yapılabilmesi için belirli ekipmanların kullanılması gerekebilir. Bir görev için kullanılacak alternatif ekipmanlar olabileceği gibi bazı görevler yalnızca bir ekipmanla veya ekip kullanılmaksızın yapılabilir. Her ekipman türünün belirli bir işletme maliyeti vardır.
- Tesiste tüm istasyonlarda çalışmak üzere yeterli işçi bulunduğu varsayılır ancak asistan ve ekipmanlar için kullanılabilir miktarların bir üst sınırı vardır.
- İstasyonlar arasında süreç içi stoklara izin verilmemektedir.
- Her bir hattaki her bir istasyonda çalışan işçiler, birden fazla ürünün görevlerini yerine getirebilecek esnek işçilerdir.
- Hatların her iki tarafında da çalışılabilir.
- Bir ortak istasyon, yalnızca komşu olarak yerleştirilmiş iki hattın görevlerini içerecek şekilde açılabilir.

Kısaltmalar (Notation)

Matematiksel modelde kullanılan kısaltmalar aşağıdaki gibidir.

İndisler

h	: montaj hattı
i, r, s	: görev
j	: istasyon
e	: ekipman türü

Parametreler ve kümeler

t_{hie0}	: h hattındaki i görevinin e ekipmanı ile asistan yardımı olmadan tamamlanma süresi
t_{hie1}	: h hattındaki i görevinin e ekipmanı ile asistan yardımıyla tamamlanma süresi
N_h	: h hattının görevleri kümesi
H	: montaj hatları kümesi
E	: ekipmanlar kümesi
E_{hi}	: h hattındaki i görevinin yapılmasında kullanılacak ekipmanlar kümesi
NE_e	: e ekipmanının kullanılabilir miktarı
NA	: kullanılabilir asistan miktarı
W	: istasyonlar kümesi
CT	: çevrim süresi
PR_h	: h hattına ait öncelik ilişkileri kümesi
$(r,s) \in PR_h$: h hattına ait bir öncelik ilişkisi; r görevi s görevinin komşu öncülüdür
M	: büyük bir sayı
c_w	: bir istasyon açmanın planlama dönemi için maliyeti (işçilik + sabit maliyetler)
c_a	: bir asistanın planlama dönemi için işçilik maliyeti
c_e	: e ekipmanının planlama dönemi için işletme maliyeti

Karar Değişkenleri

x_{hij}	: 1, h hattındaki i görevi j istasyonuna atanmışsa; 0, diğer durumda
p_{hije}	: 1, h hattındaki i görevi j istasyonuna e ekipmanı ile asistansız olarak atanmışsa; 0, diğer durumda
q_{hije}	: 1, h hattındaki i görevi j istasyonuna e ekipmanı ile asistanlı olarak atanmışsa; 0, diğer durumda
z_{hje}	: 1, e ekipmanı h hattındaki j istasyonuna atanmışsa 0, diğer durumda
u_j	: 1, j istasyonu açılmışsa; 0, diğer durumda

k_j : 1, j istasyonuna asistan atanmışsa; 0, diğer durumda
 y_{hj} : 1, j istasyonu h hattında açılmışsa; 0, diğer durumda

Matematiksel Model (Mathematical Model)

$$\text{Min} \sum_{j \in W} (c_w u_j + c_a k_j) + \sum_{h \in H} \sum_{e \in E} \sum_{j \in W} c_e z_{hje} \quad (2)$$

$$\sum_{j \in W} x_{hij} = 1 \quad \forall h \in H; \forall i \in N_h \quad (3)$$

$$\sum_{e \in E_h} (p_{hije} + q_{hije}) = x_{hij} \quad \forall h \in H; \forall i \in N_h; \forall j \in W \quad (4)$$

$$\sum_{j \in W} j(x_{hrj} - x_{hsj}) \leq 0 \quad \forall h \in H; \forall (r, s) \in PR_h \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N_h, e \in E_h} (t_{hie0} p_{hije} + t_{hie1} q_{hije}) + \sum_{i \in N_h, e \in E_h} (t_{(h+1)ie0} p_{(h+1)ije} + t_{(h+1)ie1} q_{(h+1)ije}) \leq CTu_j \quad h = 1, \dots, H-1; \forall j \in W \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_h} (p_{hije} + q_{hije}) - Mz_{hje} \leq 0 \quad \forall h \in H; \forall e \in E_h; \forall j \in W \quad (7)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{j \in W} z_{hje} \leq NE_e \quad \forall e \in E \quad (8)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in N_h} \sum_{e \in E_h} q_{hije} - Mk_j \leq 0 \quad \forall j \in W \quad (9)$$

$$\sum_{j \in W} k_j \leq NA \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N_h} x_{hij} - \|N_h\| y_{hj} \leq 0 \quad \forall h \in H; \forall j \in W \quad (11)$$

$$y_{hj} + y_{(h+a)j} \leq 1 \quad h = 1, \dots, H-2; a = 2, \dots, H-h; \forall j \in W \quad (12)$$

$$x_{hij}, p_{hije}, q_{hije}, z_{hje}, u_j, k_j, y_{hj} \in \{0, 1\} \quad (13)$$

(2) numaralı eşitlik modelin amaç fonksiyonu olup, planlama dönemi için istasyon açma, asistan ve ekipman maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti minimize etmektedir. Eşitlik (3) her bir hattaki her bir görevin mutlaka ve en fazla bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. (4) numaralı eşitlik, bir istasyona atanan kaynakları (asistan ve ekipman türü) belirlemektedir. Görevler arasındaki öncelik ilişkileri, eşitlik (5)'te verilen kısıt kümesi ile sağlanmaktadır. Eşitlik (6) bir istasyonun iş yükünün çevrim süresini aşmayacağını garanti etmektedir. Eşitlik (7) yardımıyla e ekipmanının h hattında kullanılmak üzere j istasyonuna atanıp atanmadığı belirlenmektedir. Eşitlik (8) sayesinde atanan e ekipmanı sayısının bu ekipmanın kullanılabilir miktarını aşmaması sağlanmaktadır. Eşitlik (9) bir istasyona asistan atanıp atanmadığını belirlemektedir. İstasyonlara atanan toplam asistan sayısının kullanılabilir asistan miktarını aşmaması eşitlik (10) yardımıyla sağlanmaktadır. Eşitlik (11) ve (12) açılan ortak bir istasyonun yalnızca komşu iki hattan görevler içereceğini garanti etmektedir. Son olarak eşitlik (13) modeldeki tüm karar değişkenlerinin ikili düzende olduğunu belirtmektedir.



BETONARME SONLU ELEMAN ANALİZİNDE ALTERNATİF BİR KOHEZİF ÇATLAK MODELİ

Efe SELMAN

İzmir Ekonomi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35330, İzmir, TÜRKİYE
efe.selman@ieu.edu.tr

(Geliş/Received: 10.08.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.01.2021)

ÖZ: Beton yapıların hasar değerlendirmelerinde, çatlak yüzeylerindeki kohezif etkileşimi göz önüne alan modeller, güvenilir ve gerçekçi simülasyonlara olanak tanımışlardır. Kohezif modeller, çatlak arayüzeylerinde, çatlak açılma ve kohezif kapanma gerilmeleri arasındaki dengeyi, betonun çekme yumuşaması özelliği ile birlikte göz önüne almaktadır. Bu çalışma, bu kohezif yaklaşımdan kaynaklanarak, kohezif etkileşimin çatlak yüzeylerinde betonun çekme yumuşaması davranışına göre tanımlandığı bir sonlu eleman modeli geliştirmiştir. Nümerik analizler için ABAQUS programı kullanılmıştır. Sunulan kohezif esaslı modelin etkinliğini gösterme amaçlı, diğer simülasyon Genişletilmiş Sonlu Eleman Metodu'nu kullanarak gerçekleştirilmiş ve iki yaklaşımın sonuçları yapısal parametreler bazında karşılaştırılmıştır. İki yaklaşım sonuçları arasındaki yüksek uyum, sunulan kohezif çatlak yaklaşımının doğruluğunu kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Çatlak, Kohezif etkileşim, Sonlu eleman

An Alternative Cohesive Crack Model for Finite Element Analysis of Reinforced Concrete

ABSTRACT: In the damage evaluation of concrete structures, the models based on the cohesive interaction between crack surfaces enable reliable and realistic simulations. The cohesive models take into account the equilibrium between crack opening and cohesive closing stresses at crack interfaces with the tension softening property of concrete. This study stemmed from this cohesive approach and developed the finite element model with discrete crack approach in which the cohesive interaction was defined along crack surfaces according to the tension softening behaviour of concrete. ABAQUS program was used for numerical analysis. In order to demonstrate the efficiency of proposed cohesive based approach, the other simulation was conducted by using Extended Finite Element Method and results of these two approaches were compared according to the structural parameters. The good agreement between the results of two approaches proved the accuracy of the proposed cohesive crack approach.

Key Words: Crack, Cohesive interaction, Finite Element Method

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan gerilmeler altında beton, kendi içerisinde oluşan mikro yapısal değişiklikler sebebiyle, kendine özgü bir mekanik davranış sergilemektedir. Doğrusal olmayan şekil değiştirme karakterinin yanında, yüksek basınç dayanımlarına karşılık düşük çekme dayanımında gevrek kırılma eğilimi göstermesi ve sünme etkileri, bu davranışı karmaşık hale getiren etmenlerden sayılabilir. Bu durumda, betondaki davranışı gerçekçi olarak tanımlayabilmek için, güç tükenmesi davranışı esnasında gelişecek hasar oluşumlarının nitel ve nicel olarak etkin bir şekilde değerlendirilmesi gerekliliği ön plana çıkmaktadır.

Düşük çekme dayanımı sorumlu gevrek hasar gelişimi altında, mikroçatlakların oluşması ve çatlak yüzeylerinde oluşacak etkileşimin izin verdiği ölçüde bu oluşumların ilerleyip makro düzeye erişmesi, betonun güç tükenmesi davranışında başrolü oynamaktadır. Mikro düzeyden başlayarak çatlamanın başlaması ile, betonda çatlak noktalarında yerel gerilmelerde ani değişiklikler meydana gelmektedir. Bu değişikliklerin sorumlusu, çatlak yüzeylerinde çekme gerilmesinin aşılmasıyla ortaya çıkan açılma gerilmeleri ile kohezif kapanma gerilmeleri arasındaki dengedir (Shi, 2009). Çatlak yüzeyindeki bu etkileşim, betonun mekanik davranışında ani bir şekil değiştirme yumuşaması ile gözlenmektedir. Bir başka deyişle, betonun çekme yumuşaması olarak bilinen bu olay, hasarın gelişmesini belirleyen en önemli noktalardan biridir (Shi, 2009). Çatlak yüzeylerindeki çatlak açılma ve kohezif kapanma gerilmeleri arasındaki denge, betonun çekme yumuşaması davranışı karakteri altında incelenmelidir (Shi, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi ile yürütülen çalışmalarda, mikroçatlak oluşumu, makrodüzeye ulaşması, ilerleme şekli ve betonun güç tükenmesi davranışına etkisi, direkt veya dolaylı yollarla modellenmektedir. Çatlak yapılarını modellemede kullanılan yaklaşımlar iki ana başlıkta toplanabilir. Bunlar, ayrık(discrete) ve yayılı(smear) modellemelerdir (Akkaya, 2006; Maekawa ve diğ., 2003; Jendele ve diğ., 2001; De Borst ve diğ., 2004). Yayılı çatlak modeli, çatlak oluşumlarını dolaylı yoldan tarif etmeyi seçmiştir. Sonlu eleman geometrisinde çatlak lokasyonu ve geometrisi oluşturulmadan, dolaylı olarak, betonun çekme yumuşaması davranışı altında azalan rijitlik değerleri doğrultusunda betonun malzeme davranışı güncellenmektedir. Bir başka deyişle, çatlama beton artık betondan farklı bir mekanik davranışa sahiptir (Maekawa ve diğ., 2003; Jendele ve diğ., 2001; De Borst ve diğ., 2004). Yayılı modeller, yapıların genel davranışlarının ve parametrelerinin incelenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, sonlu elemanlar metodu kapsamında çözümlenelerde yaşanacak olan çatlak lokasyonlarındaki süreksizliklerin yaratabileceği yakınsaklık sorunlarını çözmesidir (Maekawa ve diğ., 2003). Fakat yapı sisteminin yerel olarak çatlak bölgesindeki davranışı araştırılıyorsa ve çatlak karakteri tanımlanmak isteniyorsa, ayrık(discrete) modellemeler tercih edilmektedir. Ayrık modellemelerde, sonlu eleman modelinde çatlak lokasyonu ve ilerlemesi, geometriye yansıtılır. Çözümlenelerde çatlak geometrisinin direkt olarak göz önüne alınması sebebiyle, çatlak yönelim ve etkileşimleri etkin bir şekilde elde edilebilmektedir (Akkaya, 2006; Maekawa ve diğ., 2003; Jendele ve diğ., 2001; De Borst ve diğ., 2004).

Bu çalışma kapsamında çatlak oluşumlarının geometrisi bazında mekanik davranışları, doğruluk derecesi yüksek bir şekilde simüle edilmesi amaçlanmış ve bu doğrultuda yerel çatlak arayüzeylerinde çatlak oluşum ve gelişim tanımlamaları yapılacağından, ayrık yaklaşım benimsenmiştir. Literatürde ayrık ve yayılı tekniği karşılaştıran, uygulamalardaki etkinliğini tartışan birçok çalışma mevcuttur (Shi, 2009; Maekawa ve diğ., 2003). Her ne kadar hem ayrık hem de yayılı çatlak modellemeleri yaklaşımları sıklıkla kullanılsa da, hasar nitelik ve niceliğini belirlemeyi hedefleyen çalışmalarda ayrık teknik, doğası gereği, bu süreçte daha çok tercih edilmiş ve irdelenmiştir (Maekawa ve diğ., 2003).

İlk kez kohezif kapanma kuvvetlerini, Dugdale (Shi,2009; Maekawa ve diğ., 2003) çatlak plastik bölgenin ucundaki maksimum plastik gerilme değerine göre üniform olarak değişen kuvvetler cinsinden ifade etmiştir. Kohezif kuvvet ve çatlak ucundaki çekme gerilmelerinin birbiri içinde dengesi üzerine geliştirilen bu ilk metodoloji, ayrık teknikle çatlak tanımlamaların hareket noktası olmuştur (Maekawa ve diğ., 2003). Hillerborg (Shi,2009; Hillerborg ve diğ., 1976), Dugdale'nin ham modelini geliştirerek ve betonda çekme yumuşaması davranışı altında çatlak açılma ve kohezif kapanma gerilmeleri dengesini anlatarak Fiktif Çatlak Modeli'ni geliştirmiştir (Shi, 2009). Bu model, günümüz ayrık teknik yaklaşımının temel felsefesini oluşturmaktadır (Shi, 2009). Son yıllarda bir sürü çalışmalar öne çıkmış olsa da, bu çalışmanın temel aldığı en öne çıkan araştırmalar; Saloustros ve arkadaşları (Saloustros ve diğ., 2015), Dias da Costa ve arkadaşları (Dias da Costa ve diğ., 2018) ve Pham ve arkadaşları (Pham ve diğ., 2018)'nın yaptıklarıdır. Bu çalışmalarda, betonda çatlak arayüzeylerinde artan gerilme altında gelişen normal ve teğetsel gerilme ilişkileri, arayüzey rijitliğiyle tanımlanmış ve sonlu eleman modellerine yansıtılmıştır. Böylelikle çatlak ilerlerken hem arayüzey davranışı eş zamanlı olarak kontrol edilmiş, hem de hasar gelişiminin yapısal sistemin rijitliğine olan etkisi daha etkin bir şekilde

izlenebilmiştir (Saloustros ve diğ., 2015; Dias da Costa ve diğ., 2018; Pham ve diğ., 2018). Bu modellerin ortak özelliği, çatlak arayüzey kohezif davranış esaslarını çekme yumuşaması davranışıyla anlatabilmeleridir. Bahsi geçen çalışmalar, arayüzey davranışa odaklanırken çekme-ayrılma davranışının mekaniğinin en yalın örneklerinden olan delaminasyon olgusunu seçmişlerdir (Saloustros ve diğ., 2015; Dias da Costa ve diğ., 2018; Pham ve diğ., 2018). Pham ve arkadaşları'nın çalışması bir adım öne çıkarak, arayüzey davranışında hasar gelişimini asal gerilme matrisiyle açıklamıştır. Bu durum, çekme yumuşaması davranışının üç eksenli olarak tanımlanmasını sağlamıştır (Pham ve diğ., 2018). Aynı felsefeyle benzer öne çıkan çalışmalar olarak Yun ve arkadaşları (Yun ve diğ., 2018), Nikolic ve arkadaşları (Nikolic ve diğ., 2018) ve Bhowmick ve Liu'nun çalışmaları (Bhowmick ve Liu, 2018) söylenebilir.

Bu makaledeki çalışmanın temel dayanağı Ors ve arkadaşları'nın yürüttükleri çalışma olmuştur (Ors ve diğ., 2014). Bu çalışmada Ors ve arkadaşları'nın (Ors ve diğ., 2014) çalışmasındaki anlayışa paralel şekilde, yayılı ve ayrık yaklaşım teknikleri belli anlamda birleştirilerek kullanılmış, yapı mekaniği bağlamında gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bu çalışmanın mevcut literatürden ayrıldığı nokta veya bir diğer deyişle bu çalışmanın can alıcı yanı, önceden belirlenmiş çatlak lokasyonlarındaki arayüzeylerde kohezif etkileşim tanımlanmış, bunun yanı sıra yayılı teknikten baz alınarak betonun çekme yumuşaması altında azalan rijitliği göz önüne alınarak, gerilme-şekil değiştirme davranışı düzenlenip beton mekanik özelliklerine aktarılmıştır.

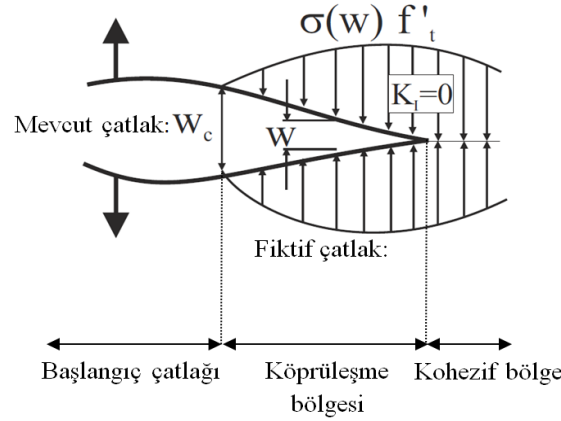
Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Metodu (XFEM) ile irdelenen çatlak oluşumu ve ilerleme analizleri, yüksek güvenilirlikleri ile sıklıkla tercih edilmektedir (Maekawa ve diğ., 2003; Patil ve diğ., 2019; Pommier ve diğ., 2011). Bu çalışmada, çalışmanın önerdiği ayrık yaklaşım felsefesini karşılaştırma amaçlı XFEM'den yararlanılmıştır. XFEM yaklaşımı, en yüzeysel tanımıyla dislokasyon veya çatlak noktalarında yeni düğüm noktaları oluşturarak gerilme şiddeti faktörleri(K)'ni çatlak oluşum kriterleri açısından değerlendirip, dış etkiler altında çatlak ilerlemesini sunmaktadır. XFEM detaylarına Teorik altyapı bölümünde değinilmiştir. Bu çalışmaya temel olan XFEM çalışmaları Patil ve arkadaşları (Patil ve diğ., 2019) ve Dirik ve Yalçınkaya (Dirik ve Yalçınkaya, 2018)'nin çalışmalarıdır. Bu çalışmalarda XFEM teorik altyapısı anlaşılır ve betonda çatlak ilerlemesi incelemelerine uyarlanabilir bir şekilde anlatılmaktadır.

Belirtilen esaslarca bu çalışmanın temel amacı, çatlak yüzeylerindeki mikro düzeydeki etkileşimi tanımlayarak, incelenen yapısal elemanın davranışını makro düzeyde doğru değerlendirebilmektir. Daha teknik açıdan tanımlanmak istenirse, çatlak arayüzeylerindeki kohezif etkileşimi, beton çekme yumuşaması başlığı altında modellemek ve bu hasar gelişim modeli yardımıyla genel olarak yapısal sistemin karakterini irdelemektir. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın akışı oluşturulmuştur. Giriş bölümünü; ayrık modelin temelini oluşturan çatlak mekaniği, betonun çekme yumuşaması ve bu çalışmada önerilen metodun karşılaştırılması için kullanılan XFEM esaslarını özet bir şekilde anlatan teorik bölüm izlemektedir. Üçüncü bölümde modelleme esasları verildikten sonra, dördüncü bölümde bu araştırmada sunulan kohezif modelleme yaklaşımının sonuçları XFEM sonuçları ile karşılaştırılmış, bulgular değerlendirilmiştir. Son bölümde ise genel sonuçlar sunulmuştur.

TEORİK ALTYAPI (THEORETICAL BACKGROUND)

Betonda en gelişmiş çatlak mekaniği modellerinin başında Fiktif Çatlak Modeli gelmektedir (Shi, 2009; Hillerborg ve diğ., 1976). Günümüzde de birçok model, bu modelden türemiş olup farklı uygulama alanlarında denenmiştir (Jendele ve diğ., 2001; De Borst ve diğ., 2004). Şekil 1'de olayın şematize hali görülmektedir. "w" mevcut çatlağın genişliği olmak üzere, "w" fiktif çatlak genişliği, " $\sigma(w)$ " çekme yumuşama bölgesi gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, " f_t " betonun çekme dayanımı ve "K" ise gerilme şiddeti faktörünü göstermektedir. Bu modelin ana ilkesi, artan gerilme altında köprüleşme bölgesinde çatlak yüzeylerinde oluşan çatlak açılma gerilmeleri ile kohezif bölgede oluşan kohezif kapanma gerilmeleri arasındaki dengeye bağlıdır. Çatlağın ilerlemesi için çatlak açılma gerilmelerinin kohezif kapanma gerilmelerini yenmesi gerekmekte, sonrasında ise köprüleşme bölgesinin çekme yumuşaması davranışı göstermesi beklenmektedir.

Çekme yumuşaması, çekme dayanımının aşılması ile mikroçatlamanın başlaması ve çatlak genişliğinin artmasını gösteren ilişkidir. Şekil 2'de " $f_t = f_{ct}$ " çekme dayanımını göstermek üzere, " E_t " betonun çekme elastisite modülü, denklem (1) ile ifade edilen " w_{tu} " çatlak açılma deplasmanını ve denklem (2) ile (Shi, 2009; Hillerborg ve diğ., 1976) tarafından önerildiği üzere " G_{fu} " ise çekme yumuşaması altında kalan alan olan kırılma enerjisini göstermektedir. Denklem 2'de " d_a " maksimum agrega çapını ve " f_c " ise betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir. Şekil 2'de ayrıca C25 betonu için bu modelin uygulanmış hali de genel modelin yanında sunulmuştur.



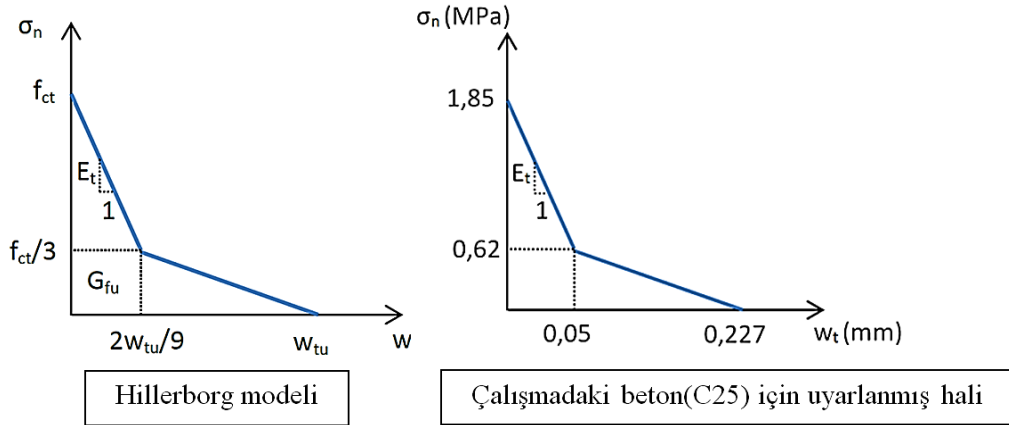
Şekil 1. Betonda Fiktif Çatlak Modeli'nin şematize gösterimi (Shi, 2009)

Figure 1. Schematic representation of Fictitious Crack Model in concrete (Shi, 2009)

$$w_{tu} = \frac{18 G_f}{5 f_{ct}} \quad (1)$$

$$G_f = [10^{-3} (0.0469 d_a^2 - 0.5 d_a + 26)] \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.7} \quad (2)$$

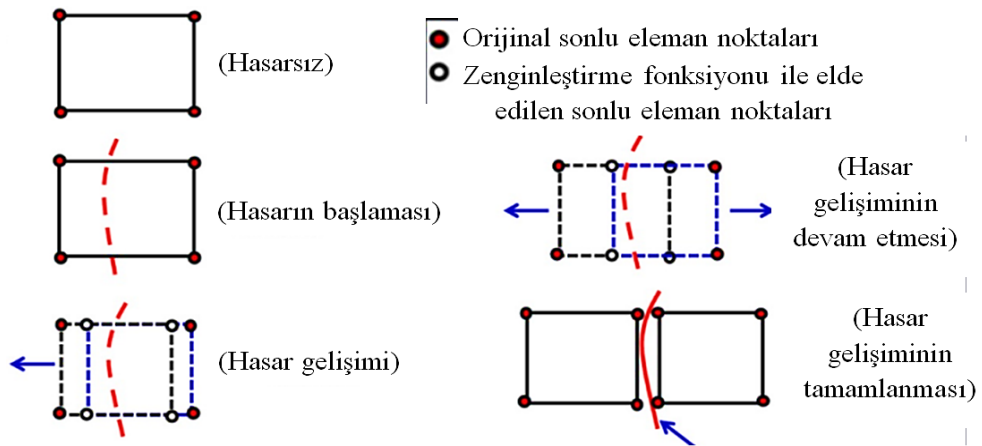
Çekme yumuşaması, köprüleşme bölgesinde tanımlanırken bir diğer husus, çatlakın çok modlu doğası gereği yüzeylerinde oluşacak teğetsel gerilmelerin de varlığıdır. Fakat bu gerilmeler çalışmada sunulacak kohezif modelleme tekniği ile sonlu eleman programına dahil edilmiştir. Çalışma kapsamında ABAQUS programı kullanılmıştır (Abaqus, 2018). Teğetsel gerilmeler çatlak kayma deplasmanını getirmektedir. Çatlak ilerleme profili, çatlak açılma deplasmanları ve çatlak kayma deplasmanlarının sisteme adaptasyonu ile belirlenmektedir. Çekme yumuşamasına benzer şekilde, geçmiş çalışmalarda teğetsel gerilmelerle çatlak kayma deplasmanlarını ilişkilendiren modeller mevcuttur (Shi, 2009; Maekawa ve diğ., 2003; Saloustros ve diğ., 2015; Ors ve diğ., 2014). Fakat Modelleme bölümünde anlatılacağı üzere, çalışma kapsamında çekme yumuşaması davranışının gerçekçi olarak yansıtılabilmesi için, çekme yumuşaması, ABAQUS (Abaqus, 2018) sonlu eleman programında birebir olarak kohezif etkileşimde tanımlanmıştır. Programın çekme yumuşaması altında kohezif ara yüzeyin üç boyutlu deforme olmuş şeklini hesaba katmasıyla oluşan teğetsel gerilmeler altındaki kayma deplasmanları da böylelikle göz önüne alınmış olmaktadır.



Şekil 2. Betonda çekme yumuşaması davranışı ve uygulanması (Shi, 2009)

Figure 2. Tension softening in concrete and application (Shi, 2009)

Çatlak ilerlemesini modelleyen bir başka etkili modül ise Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Metodu(Extended Finite Element Method-XFEM) yaklaşımıdır (Pommier ve diğ., 2011). Bu yaklaşım, temel olarak deforme olmuş çatlak yüzeylerinde komşu bağlı noktalar arasındaki düzensizliklerin çözümüne olanak tanımaktadır. Temel mantığı, çatlak ucundaki kuvvetlerin dengesi prensibi ile, kohezyon kuvvetlerini gerilme şiddeti faktöründen (K) yararlanarak hesaplama üzerine kuruludur (Pommier ve diğ., 2011). Gerilme şiddeti faktörü(K), her modda çatlak ucu etrafındaki gerilme dağılımı fonksiyonunu göstermektedir. Her çatlakta lokal bazda bağımsız olarak çalışması sebebi ile çatlama kriterini ifade etmede sıklıkla tercih edilmektedir. Çatlak yüzeyindeki çekme gerilmesi ve kohezif kapanma gerilmesi dağılımlarının dengesi, çatlağın ilerlemesinde belirleyici rol oynamaktadır. XFEM(Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Metodu) tanımlaması ve yer değiştirme vektörüne ulaşması en temel anlamda (3) nolu denklemle açıklanabilir (Pommier ve diğ., 2011). “Γ” modeldeki düğüm noktalarını göstermek üzere, “Γ_t” ve “Γ_c” sırasıyla çatlak yüzü ve ucundaki düğüm noktalarını simgelemektedir. Bu (3) nolu denklemde “u_{xfem}” yer değiştirme vektörünü, “N_i” düğümsel şekil fonksiyonunu, “u_i” zenginleştirilmemiş düğüm noktaları için düğümsel yer değiştirme vektörünü göstermektedir. Zenginleştirme fonksiyonu olarak “H(x)” ile gösterilen Heaviside fonksiyonu kullanılmaktadır. “a_i”, Heaviside fonksiyonu ile ilgili düğümsel zenginleştirilmiş serbestlik derecesi vektörü, “F_a(x)” asimptotik çatlak ucu fonksiyonu ve “b_i” ise çatlak ucu zenginleştirilmesi ile ilgili düğümsel zenginleştirilmiş serbestlik derecesi vektörünü göstermektedir (Pommier ve diğ., 2011; Islam ve diğ., 2017)



Şekil 3. XFEM tekniğinin şematik olarak açıklanması (Islam ve diğ., 2017)

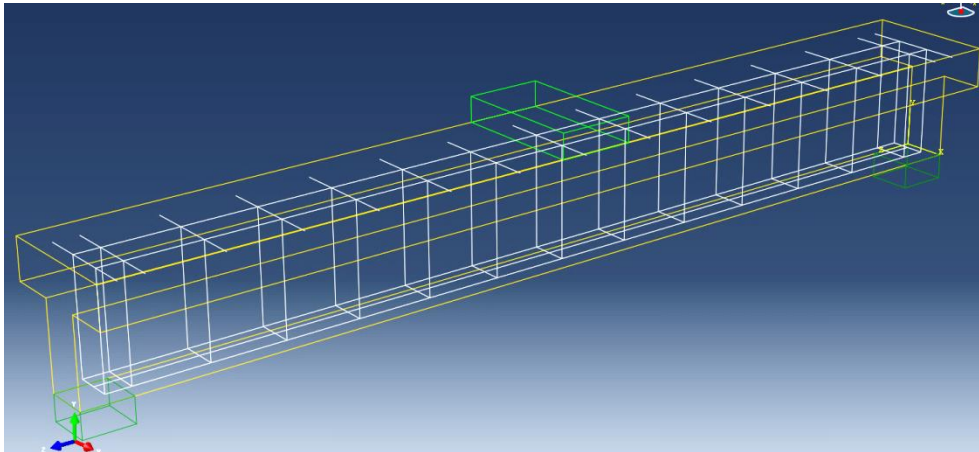
Figure 3. Schematic explanation of XFEM technique (Islam et al., 2017)

$$u_{xfem} = \sum_{i \in \Gamma} N_i(x)(u_i) + \sum_{i \in \Gamma_c} N_i(x)H(x)(a_i) + \sum_{i \in \Gamma_t} [N_i(x) \sum_{a=1}^4 F_a(x)b_i^a] \quad (3)$$

XFEM, Şekil 3'te şematize edildiği üzere çatlak ilerlemesi sırasında zenginleştirme fonksiyonlarından yararlanarak çatlak lokasyon ve yönelimini tarif edecek yeni düğüm noktaları oluşturur. Bu yeni ve orijinal noktalara eklenen düğüm noktaları sayesinde gelişen çatlak geometrisi elde edilebilmektedir. Çatlak geometrisinde böylelikle gerilme şiddeti faktörü(K), hesaplanabilecek, çatlak yüzeylerinde gerilme dağılımı incelenebilecek ve olası çatlak ilerleme analizleri yapılabilir. Şekil 3 yöntemin çalışma şeklini somut bir şekilde aktarmaktadır (Islam ve diğ., 2017).

MODELLEME (MODELLING)

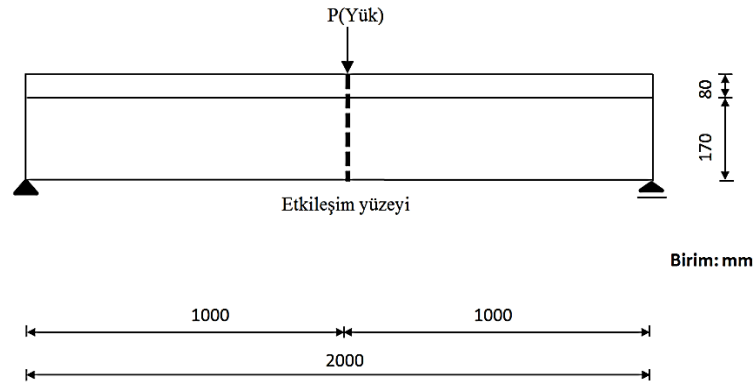
Çalışmada sonlu eleman modelleme kapsamında kullanılan program, önceden de belirtildiği üzere ABAQUS (Abaqus, 2018) programı olup, Şekil 4'de bu programda hazırlanan sonlu eleman modeli gösterilmektedir. Çatlak davranışını inceleme amacıyla, bu kiriş elemanda ayrık(discrete) çatlak modelleme tekniğinden yola çıkılarak, Şekil 5'te de görüleceği üzere, yükleme altında ilk oluşan ana eğilme çatlak geometrisi tam ortadan yüzeye dik olacak şekilde idealize edilerek göz önüne alınmıştır. Çatlak geometrisi, beton elemanın ortasındaki ayrık yüzeyde tanımlanmıştır. Şekil 6'da ise betonarme elemanın donatı konfigürasyonu ve geometrisi ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Bu noktada ayrık yüzeyde çatlak yüzeylerindeki davranışı anlatabilme amacıyla, detayları bu bölümde anlatılacak, A1 ve A2 isimleriyle kodlanmış, iki farklı modelleme yaklaşımından yararlanılmıştır.



Şekil 4. Üç boyutlu ABAQUS betonarme modelinin gösterimi (Abaqus, 2018)

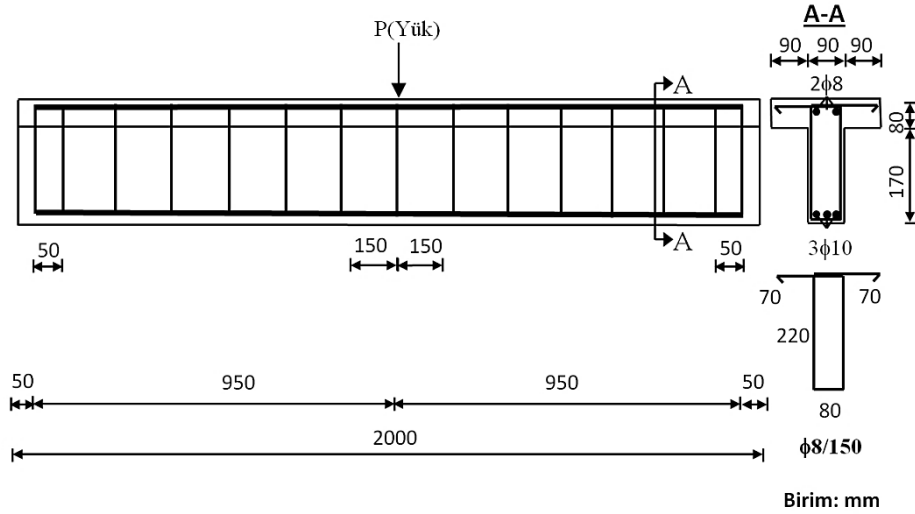
Figure 4. Representation of the 3d ABAQUS reinforced concrete model (Abaqus., 2018)

Tahmin edileceği üzere, Şekil 4'te sarı renkle görülen sonlu eleman betonarme eleman, yeşil renkle görülen eleman ise çelik rijit levhalardır. Beyaz renkli çubuk elemanlar ise boyuna donatı ve etriyeleri simgelemektedir. Deney düzeneği kapsamında basit kiriş mesnet şartlarını oluşturacak şekilde, başlangıç ve bitiş noktalarında sınır şartları belirlenmiştir. Bu sınır şartları, çözümlenmelerde olası bir sonlu eleman yakınsaklık sorunu yaşanmaması için iki adet rijit olarak tanımlanan 100*50*300 mm (En*Boy*Açıklık) boyutlarında çelik bloğa verilmiş olup, bu çelik bloklarla elemanın bağlantısı ABAQUS (Abaqus, 2018) programında "Tie(Bağ)" ile sağlanmıştır. Yükleme için de aynı tekniğe başvurulmuş olup, yükleme levhası da sınır şartları levhaları ile özdeş çelik rijit blokla tanımlanmıştır. Yükleme levhası ile eleman da yine aynı şekilde "Tie(Bağ)" ile bağlanarak birlikte çalışması sağlanmıştır. Çelik rijit blokların malzeme mekanik özellikleri, program kapsamında sadece elastik özellikleri girilmiş olup, bu değerler; yoğunluk " γ ", $\gamma=7.85\text{g/cm}^3$, Elastisite modülü "E", $E= 210000\text{ MPa}$ ve Poisson oranı " ν ", $\nu=0.3$ olarak dikkate alınmıştır. Bulgular kısmında da belirtildiği ve değerlendirildiği üzere, modellerin yük-orta nokta deplasman grafikleri analiz kapsamında elemanın deplasman kontrollü analizi yürütülmüş ve gerekli irdelemeler yapılmıştır.



Şekil 5. Betonarme elemanın geometrisi ve çatlak etkileşim yüzeyi

Figure 5. Geometry of reinforced concrete model and crack interaction surface



Şekil 6. Betonarme elemanın geometrisi ve donatı konfigürasyonu

Figure 6. Geometry and rebar configuration of reinforced concrete model

Modelleme çalışmaları kapsamında beton eleman, katı eleman(solid) C3D8R sonlu eleman türünde modellenmiştir. C3D8R elemanı, sekiz düğüm noktasına ve bir integrasyon noktasına sahip lineer üç boyutlu heksahedral sonlu eleman ağ modelidir. Kullanılan teknik modül ise Beton Hasarlı Plastisite (Concrete Damaged Plasticity-CDP)'dir (Abaqus, 2018). Bu modül gerilme şekil değiştirme ilişkilerinin akma yüzeyi ile desteklendiği betonu oldukça iyi açıklayan bir tanımlama yöntemidir. Çizelge 1'de CDP tekniği kapsamında girilen malzeme sınıfı C25 olan betonun modüle işlenen temel mekanik parametreleri listelenmiştir.

Çalışma kapsamında seçilen beton modeli basınç davranışı için betonun güç tükenmesini özellikle en büyük dayanım noktasından sonra gerçekçi bir şekilde tanımlayan Mander-Priestley-Park modelidir (Mander ve diğ., 1988). Şekil 6'dan da görüldüğü üzere sargısız beton için birim şekil değiştirme $\epsilon_{co} = 0.002$ mm/mm değerinde beton nihai basınç dayanımına ulaşmaktadır. Bu değerden sonra dayanımı azalışa geçen beton, $\epsilon_c = 0.0035$ mm/mm'de yaklaşık bu değer iki katı olan birim deformasyon değerinde göçme kapasitesine ulaşmaktadır. Dayanımın sıfır olduğu nokta ise birim şekil değiştirme $\epsilon_c = 0.005$ mm/mm değeridir. (4) nolu formülde de görüldüğü üzere herhangi bir andaki basınç gerilmesi değerine " f_c ", kuşaltılmış beton basınç dayanımının " x " ve " r " oranları ile ilişkilendirilerek ulaşılmaktadır. " x " oranı (5) nolu denklemde açıklandığı üzere betonun " f_c " dayanımında iken sahip olduğu birim deformasyon " ϵ_c " 'nin, " ϵ_{cc} " ile gösterilen kuşaltılmış beton basınç dayanımına karşılık gelen birim deformasyona oranıdır. " r " ise beton elastisite modülü " E_c " 'nin, beton elastisite modülü " E_c " ile sekant elastisite modülü olan " E_{sec} " farkına oranıdır. " r " oranı (6) nolu denklem ile

tanımlanmıştır (Mander ve diğ., 1988). Hiç şüphesiz, modelleme kapsamında sargısız beton modeli kullanılmıştır. Burada sargılı veya başka bir deyişle kuşatılmış beton davranış ilişkilerinin de gösterilme sebebi konu bütünlüğünün bozulmaması adınadır.

Çizelge 1. Beton için CDP modelinde kullanılan malzeme parametreleri

Table 1. Material parameters used in the CDP model for concrete

CDP Parametreleri	
Yoğunluk (γ) (g/cm ³)	2,5
Elastisite modülü (E) (MPa)	32500
Poisson oranı (ν)	0,2
Dilatasyon açısı (Φ)	30°
Başlangıç plastik basınç dayanımı (f_{pci}) (MPa)	15,4
Karakteristik basınç dayanımı (f_c) (MPa)	25
Çekme dayanımı (f_t) (MPa)	1,85
İki eksenli/tek eksenli basınç birim şekildeğiştirme oranı (ξ)	1,6
İnvariant gerilme oranı (δ)	0,6667

$$f_c = \frac{f'_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (4)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (5)$$

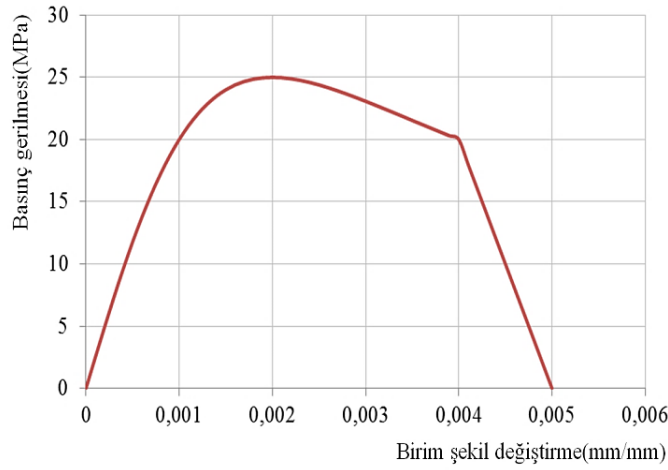
$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} \left[1 + 5 \cdot \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left[-1,254 + 2,254 \cdot \sqrt{1 + \frac{7,94 \cdot f'_l}{f'_{c0}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{c0}} \right] \quad (8)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (9)$$

Kuşatılmış beton basınç dayanımına karşılık gelen birim deformasyon “ ϵ_{cc} ” bulunması için model (7) nolu ilişkiyi önermektedir. Bu formülizasyonda “ f'_{co} ” sargılanmamış beton basınç dayanımını gösterirken, “ ϵ_{co} ” ise kuşatılmamış betonda tasarım mukavemetinde birim şekil değiştirme değeri olan 0.002’ye karşılık gelmektedir. Beton sekant elastisite modülü “ E_{sec} ” ve kuşatılmış beton dayanımını (f'_{cc}) bulmada kullanılan bağıntılar (8) ve (9) nolu denklemlerde verilmektedir. (9) nolu denklemde görüldüğü üzere, “ f'_{cc} ”, kuşatılmamış beton basınç dayanımı olan “ f'_{co} ” ve kuşatılmış çekirdek beton etkin yanal kuşatma gerilmesi olan “ f'_t ” ile ilişkilendirilmiştir (Mander ve diğ., 1988) (4) no.’ludan (9) no.’lu denkleme kadar olan seri göz önüne alınarak, Şekil 7’deki sargısız beton modeli basınç gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi verilmiştir.



Şekil 7. Betonun Mander- Priestley- Park beton modelince basınç gerilmesi-birim şekil değiştirme modeli (Mander ve diğ., 1988)

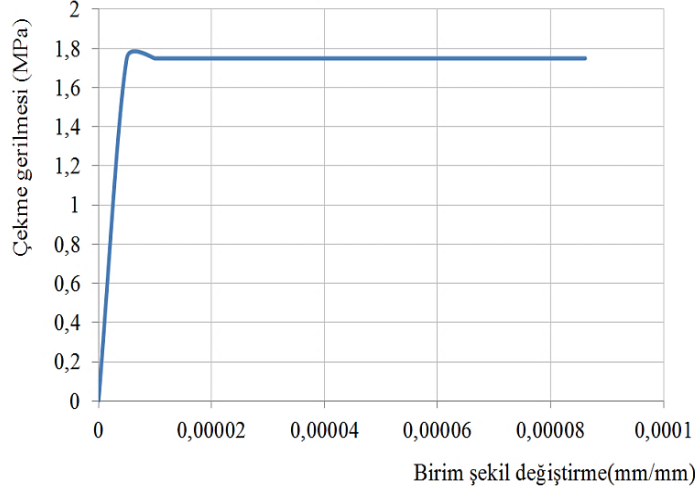
Figure 7. The compressive stress-strain behavior of concrete according to Mander-Priestley-Park concrete model (Mander et al.,1988)

Betonun çekme davranışı için Chang-Mander beton modeli seçilmiştir (Chang ve Mander, 1994). Çekme gerilmesi-şekil değiştirme ilişkisi için, (10), (11) ve (12) nolu bağıntılarda “ f'_t ” incelenen noktada çekme kuvvetini ve “ f'_t ” çekme dayanımını gösterirken n ve x oransal büyüklükler (11) ve (12)’de gösterilmektedir.” r ” katsayısı ise şekil faktörü olup literatürde $r = 4$ değerinin doğru sonuçlar vermesi nedeni ile önerildiği notlara eklenmiştir (Tort ve Hajar, 2004). (11) ve (12) nolu bağıntılardaki “ E_t ” betonun çekme elastisite modülü, “ f'_{co} ” sargılanmamış beton basınç dayanımını, “ ϵ'_t ” incelenen noktada çekme gerilmesine karşılık gelen birim şekil değiştirme, “ ϵ_{tt} ” çekme dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmeyi göstermektedir. (10), (11) ve (12) nolu denklemler esas alınarak betonun çekme gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 8’de olduğu gibi elde edilmiştir.

$$f_t = f'_t \frac{nx}{1 + (n - \frac{r}{r-1}).x + \frac{x^r}{r-1}} \quad (10)$$

$$n = \frac{E_t f'_{c0}}{f'_t} \quad (11)$$

$$x = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tt}} \quad (12)$$



Şekil 8. Betonun Chang- Mander beton modelince çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme modeli (Chang ve Mander, 1994)

Figure 8. The tensile stress-strain behavior of concrete according to Chang-Mander concrete model (Chang and Mander, 1994)

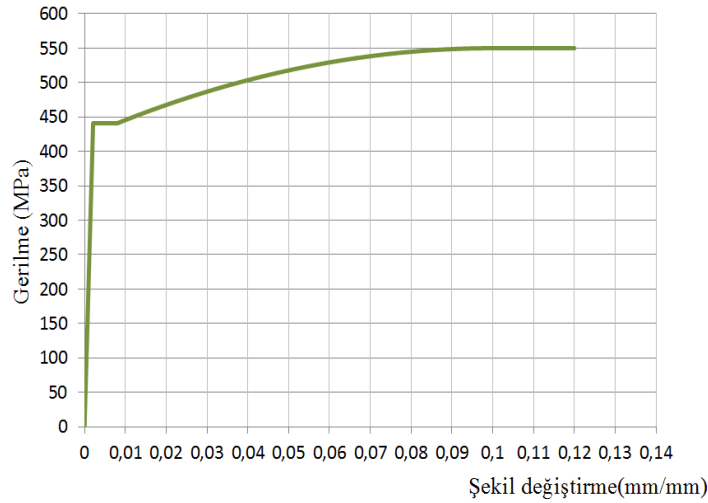
Çalışma kapsamında donatı çeliği modeli olarak, basınç ve çekme altında, elastoplastik Chang ve Mander (Chang ve Mander, 1994) donatı çeliği modeli kullanılmıştır. Model, (13), (14) ve (15) denklemleriyle özetlenmiştir. Bu ilişkilerde bahsi geçen parametreler, sırasıyla, “ f_s ” donatı çeliğindeki gerilme, “ E_s ” donatı çeliğinin elastisite modülü, “ ε_s ” donatı çeliğinin birim şekil değiştirmesi, “ f_{sy} ” donatı çeliğindeki akma dayanımı, “ ε_{sy} ” donatı çeliğinin akma birim şekil değiştirmesi, “ f_{su} ” donatı çeliğindeki kopma dayanımı, “ ε_{su} ” donatı çeliğinin kopma birim şekil değiştirmesi, “ ε_{sh} ” donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekil değiştirmesini simgelemektedir. Bu modele göre, donatı çeliğinin akma gerilmesine kadar gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi çeliğin elastisite modülünce lineer olarak oluşturulmaktadır. Akma gerilmesinde şekil değiştirme “ ε_{sy} ” ‘den “ ε_{sh} ” ‘ye kadar ötelenmektedir. “ ε_{sh} ” ‘den sonra pekleşmenin etkisiyle dayanım, kopma birim şekil değiştirmesi olan “ ε_{su} ” ‘ya kadar artarak “ f_{su} ” kopma dayanımına kadar çıkmaktadır. B420C donatı çeliği için TBDY 2018’de de önerildiği üzere $\varepsilon_{sy} = 0,002$ mm/mm, $\varepsilon_{sh} = 0,0075$ mm/mm, $\varepsilon_{su} = 0,12$ mm/mm ve $f_{su} = 550$ MPa olarak belirtilmiştir. Şekil 9’da donatı çeliğinin basınç ve çekme gerilme-birim şekil değiştirme davranışı grafikte özetlenmiştir. Çeliğin elastik malzeme parametreleri, sırasıyla, Elastisite modülü, “ E_s ”, $E_s = 210000$ MPa ve Poisson oranı, “ ν ”, $\nu = 0,3$ alınmıştır.

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s < \varepsilon_{sy} \quad (13)$$

$$f_s = f_{sy}, \quad \varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad (14)$$

$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_s)^2}{(\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh})^2}, \quad \varepsilon_s > \varepsilon_{sh} \quad (15)$$

Çalışma dahilinde, yükleme altında beton ve donatının birlikte çalışabilmesi için bir başka deyişle beton-donatı aderansı, Gömülü eleman(embedded) tekniği ile modellemeye yansıtılmıştır. Bu tekniğe göre betondaki düğüm noktaları ev sahibi (host) bölge, donatıdaki noktalar ise gömülü bölge (embedded) olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Donatı çeliğinin Chang- Mander çelik modelince gerilme-birim şekil değiştirme modeli (Chang ve Mander, 1994)

Figure 9. The stress-strain behavior of steel reinforcement according to Chang-Mander steel model (Chang and Mander, 1994)

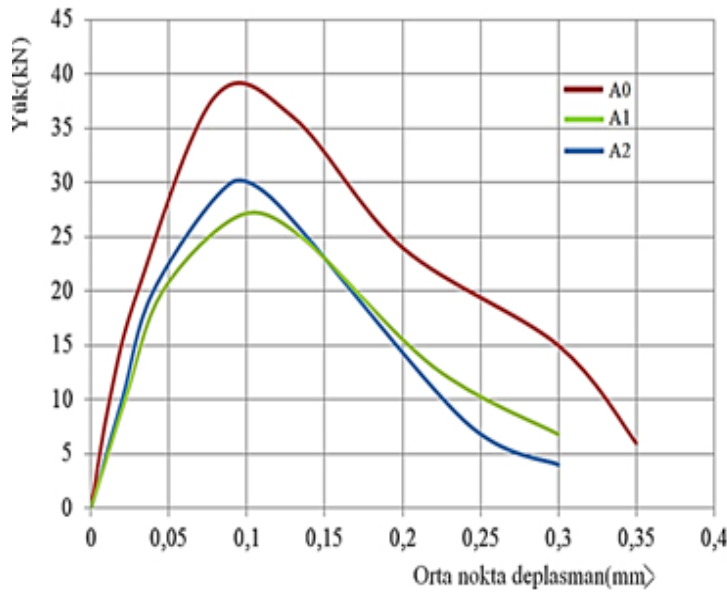
Modellemeler kapsamında A1 modeli yaklaşımı başlığı altında çatlak etkileşim yüzeyinde ABAQUS(Abaqus, 2018) programında yüzeyler arası etkileşim(Interaction/surface to surface contact) tekniği seçilmiş ve burada yüzey bazında çatlak ilerleme özellikleri belirlenmiştir. Etkileşim bazında yararlanılan iki modül bulunmaktadır. Bu modüller, Hasar(Damage) ve Kohezif davranış (Cohesive behavior) modülleridir. Burada birebir anlamda amaçlanan Fiktif Çatlak Modeli esaslı çatlak yüzeylerindeki çatlak açılma ve kohezif kapanma kuvvetleri dengesine dayanan modeli tanımlayabilmektir. Şekil 2’de tanımlanan çekme yumuşaması altında çatlak açılma deplasmanı ve takibinde gelişen kayma gecikmesi esaslı çatlak yüzeyleri kayma deplasmanı davranışları bu modüllere aşağıda anlatılacağı üzere yansıtılmıştır. Hasar(Damage) modülü kapsamında başlangıç çatlak oluşumu kriteri yine Şekil 2’de görülmek üzere C25 beton sınıfı özelliklerince çekme için “ f_{ct} ”=1.85 MPa, kayma için “ f_s ”=0.95 MPa ve kırılma enerjisi “ G_f ”=0.11 N/mm olarak tanımlanmıştır. Kayma için belirlenen kriterle teğetsel gerilmelerin çatlak kayma deplasmanına etkisi göz önüne alınmıştır. Kayma dayanımı kriteri, Shi(Shi, 2009)’nin özdeş yükleme altındaki aynı boyutlu kirişlerde yürütülen üç noktalı eğilme deneylerinden yola çıkılarak yaklaşık olarak çekme dayanımının yarısı olarak değer aldığı belirtilmiştir. Zaten literatürdeki birçok modelde çatlak arayüzeylerindeki kayma gerilmesi-çatlak kayma deplasmanı ilişkisi için deneysel çalışmaların yardımıyla kayma dayanımı kriteri, çekme dayanımının yarısı olarak önerilmektedir (Shi, 2009; Maekawa ve diğ., 2003; Bhowmick ve Liu, 2018). Bu kayma dayanımı değerinden sonra çatlak kayma deplasmanı yapmaya başlamaktadır. Bu önerinin kullanılma sebebi, kayma deplasmanı adına pratik çıkarımlar yapabilmek adına. Kırılma enerjisi ise yine özdeş yükleme altında ve aynı boyutlu kirişle Shi(Shi,2009)’nin yaptığı üç noktalı eğilme deneylerinde ölçülen “ G_f ”=0.11 N/mm değeridir. Hasar modülünde deplasman değerleri bazında ise Şekil 2’deki çekme yumuşaması davranışındaki gerilmeye karşılık gelen çatlak açılma miktarları girilmiştir.

A1 yaklaşımının ikinci kolu olan “Kohezif davranış” modülü kapsamında ise Şekil 2’deki çekme yumuşaması başlangıç rijitlik değerleri girilmesi planlanmaktadır. Bu modülde betonun çekme ayrılma ilişkisi “Hasar” modülü kısmında tanımlandığı için ayrıca bir rijitlik değeri girilmeden, yüzeyler arası kohezif davranışı betimleme amaçlı, programa girilen çekme-ayrılma(traction-separation) ilişkisinden yararlanarak, eksenel rijitlik değeri olan “ K_{nn} ”, sırasıyla düzlem içi ve düzlem dışı kayma rijitlik değerleri olan “ K_{ss} ” ve “ K_{tt} ” rijitlik değerlerini programın kendisinin hesaplamasına olanak tanıyan mevcut seçenek “default” işaretlenmiştir. Bu sayede, çatlak gelişimi altında, arayüzey rijitlik değerlerini programın kendisinin güncellemesi sağlanmıştır. Çatlak kayma deplasmanı yüzeylerde değerlendirilmiş olup, deforme olmuş çatlak profil geometrisine yansıtılmıştır.

A2 yaklaşımı ise birebir anlamda XFEM tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. XFEM tekniği kapsamında çatlak geometrisi ayrı bir tek eksenli eleman (wire) olarak katı(solid) eleman üzerine yerleştirilmiştir. Daha sonra bu geometride etkileşim başlığı altında programda otomatik tanımlı çatlak ataması yapılmıştır. Çatlak geometrisine atanan etkileşim XFEM olarak belirlenmiş ve takibinde "q" vektörü ile çatlak doğrultusu önceden gösterilmiştir. Teorik yaklaşımı Teorik Altyapı kısmında anlatılan XFEM tekniği böylelikle birebir olarak program tarafından sisteme uygulanmıştır. XFEM tekniğinin kullanılma sebebi, çalışma kapsamında sunulan A1 yaklaşımının geçerliliğini değerlendirebilmek amacıyla. XFEM tekniği(Pommier ve diğ., 2011) önceden de belirtildiği üzere, çatlak oluşumu ve ilerleme mekanizmalarını başarıyla gösteren etkili bir tekniktir.

BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

Önceden de belirtildiği üzere, çalışma kapsamında değerlendirilen sonlu eleman modelinin orta noktasında bulunan çatlakın modellenmesinde A1 ve A2 olmak üzere iki farklı yaklaşım değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda sistemin yapısal davranışının belirlenmesinde Şekil 10'da görülen yük(kN)-orta nokta deplasman(mm) eğrileri karşılaştırılmıştır. Şekil 10'da kırmızı eğriyle gösterilen A0 yaklaşımında herhangi bir çatlak oluşturulmamış elemanın kusursuz olduğu varsayılmıştır. A1 ve A2 yaklaşımları ayrık(discrete) tekniğe dayanan yaklaşımlar olup kısaca tanımlamalarıyla hatırlatılmak istenirse, A1 kohezif davranışla çatlak tanımlayı seçen metod iken, A2 yaklaşımı XFEM modülünü kullanan yaklaşımdır. Beklenildiği üzere A0 çatlak konfigürasyonu içermemesi sebebiyle A1 ve A2'nin üzerinde kalarak, yük olarak en yüksek yaklaşık 38 kN'a kadar çıkarırken daha sonra yaklaşık 6 kN civarına düşerek nihai noktada 0,35 mm deplasman yapmıştır. Çatlakın oluşturulması ile yük taşıma kapasitesi ve orta nokta deplasman değeri düşmektedir. Fakat A1 ve A2 yaklaşımları ile elde edilen eğrilerin tutarlılığı oldukça iyi seviyededir. A1 en büyük yük taşıma kapasitesini 27,2 kN olarak belirlerken A2 bu değeri 30,3 kN olarak belirlemiştir. Daha dikkat çekici olan nokta nihai deplasmanlar neredeyse çakışmış olup A1'de 0,305 mm olan bu değer A2'de 0,301 mm olarak elde edilmiştir. A1 ve A2 yaklaşımları ile elde edilen diğer yük-deplasman değer serileri de, eğri şekilleri birbirleri ile karşılaştırıldığında oldukça yakın olduğu görülmektedir.

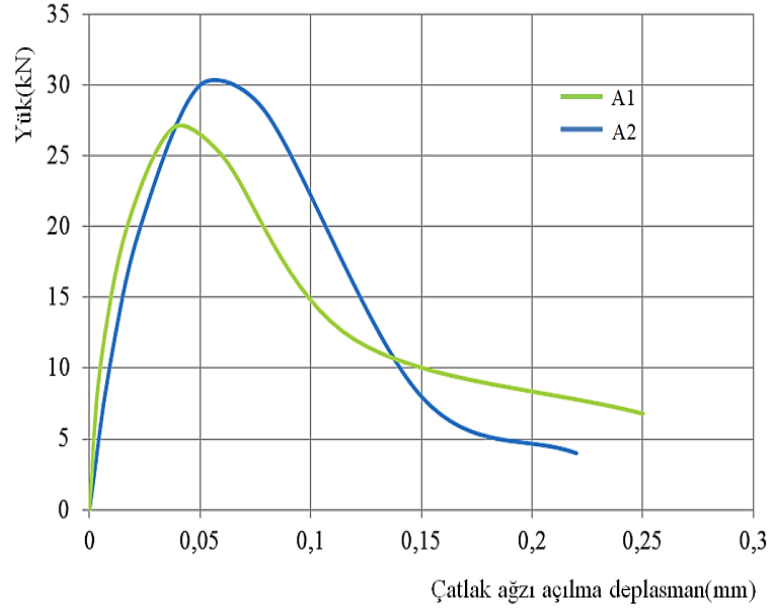


Şekil 10. Sonlu eleman modellerinin yük(kN)-orta nokta deplasman(mm) eğrileri

Figure 10. The load(kN)-mid. displacement curves of finite element models

Şekil 11'de ise A1 ve A2 yaklaşımlarıyla elde edilen çatlak ağzı açılma deplasmanları(crack mouth opening displacement -CMOD) ilgili yük seviyelerinde karşılaştırılmıştır. Çatlak ağzı açılma

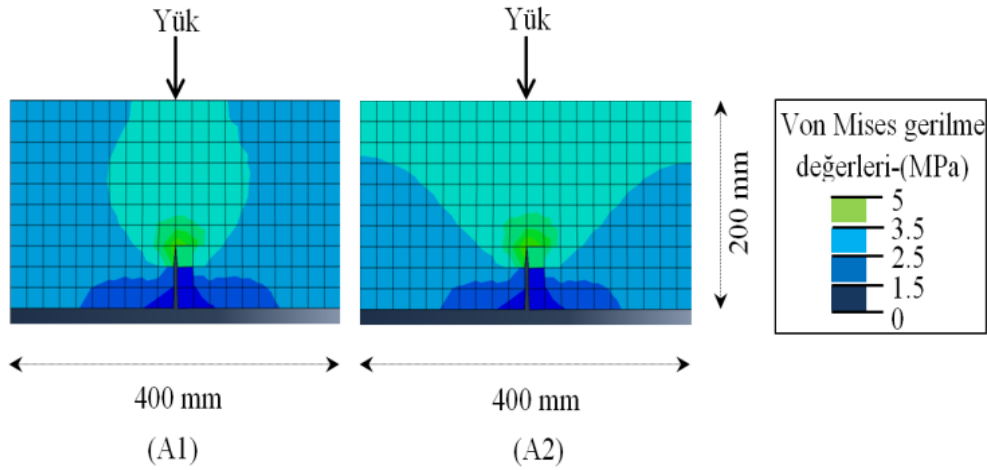
deplasmanı, çatlağın başlangıç bölgesindeki genişliğidir. Eğrilerin karakterinden de anlaşılacağı üzere, özellikle maksimum yüke kadar neredeyse birebir örtüşen davranışlarla karşılaşmıştır. A1 yaklaşımı, kohezif davranış esasları gereğiyle modellendiğinden, maksimum yükü (27,2 kN), XFEM tekniğine göre hazırlanan A2 yaklaşımının belirlediği yüke (30,3 kN) göre biraz daha az belirlemiş ve bu noktadan sonra eğriler arasında değersel olarak belli bir fark gözlenirse de, eğrinin şekilsel karakteri değerlendirildiğinde, nihai çatlak ağzı açılma deplasmanına kadar yumuşama davranışı iki yaklaşım sonuçlarınınca da benzer şekilde devam etmiştir. A1 yaklaşımı nihai çatlak ağzı açılma deplasmanını 0,25 mm belirlerken, A2 bu değere yeteri yakınlıkta olup 0,22 mm olarak göstermiştir.



Şekil 11. Sonlu eleman modellerinin yük(kN)-çatlak ağzı açılma deplasman(mm) eğrileri

Figure 11. The load(kN)-crack mouth opening displacement(CMOD,mm) curves of finite element models

Şekil 12’de ise karşılaştırılmalı olarak A1 ve A2 yaklaşımlarıyla elde edilen elemanın nihai şekil değiştirme kapasitesinde elde edilen çatlak profilleri ve Von Mises gerilme dağılımları ile sunulmuştur. Değerlendirme için, elemanda çatlağın bulunduğu bölge olan açıklığın ortasındaki 20*40 cm’lik bölgeye yaklaşılmıştır. Yakınlaşılacak bölge dışındaki gerilme dağılımları eşdeğer olarak gözlenmiştir. İki yaklaşımda da çatlak profillerinin deforme olmuş çatlak yüzeyleri açısından çok benzer olması dikkat çekicidir. Gerilme dağılımlarında ise her ne kadar çatlak yüzeylerindeki dağılımlar değersel ve dağılımsal açıdan benzerlik gösterse de, çatlak komşuluğundaki bölgede veya diğer bir deyişle açıklığın ortasındaki 40 cm’lik bölgede küçük bir farklılık görülmektedir. Fakat bu farklılık, yöntemlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Kohezif yaklaşım olan A1’de, etkileşim yüzeyinin boyu boyunca tanımlanması, etkileşim yüzeyi boyunca görece olarak daha yüksek Von Mises gerilme değerlerinin kümelenmesine sebep olmuştur. XFEM ile çözüm yapan A2 yaklaşımı ise ortada birim çatlak tanımlaması ile yola çıktığından, gerilme dağılımı sadece çatlak geometrisi boyunca yığılmamış, A1 yaklaşımına göre biraz daha eleman üst bölgesine yayılmıştır. Ama bu değerlerin Von Mises değerleri olduğunun altı çizilmelidir. Bunun yanı sıra, çalışma kapsamında çatlak davranışını sonlu eleman dilinde ayrıntılı betimlemek adına, kiriş elemanda sadece ilk oluşacak eğilme çatlağı modellenmiştir. Eğilme çatlağının başlangıç ve köprüleşme bölgesindeki gerilme dağılımlarının iki yöntemle de birbirine çok yakın olarak gözlemlendiği vurgulanmalıdır. Artan yükleme altında oluşacak diğer çatlak ve çatlak yüzeylerinin tanımlanmasıyla, bütün elemanın gerilme dağılımı açısından iki yöntem sonuçları arasında birebir özdeşlik kurulacağı düşünülmektedir.



Şekil 12. Sonlu eleman modellerinin orta nokta çatlak profillerinin karşılaştırılması
 Figure 12. Comparison of midpoint crack profiles of finite element models

SONUÇ (CONCLUSION)

Dış etkiler altında betonda gelişmekte olan hasarın tanımlanmasında çatlak oluşumlarının gerçekçi olarak modellenmesi kuşkusuz oldukça önemlidir. Elemanların yapısal performanslarının değerlendirilmesi ancak hasarın doğru bir nitel ve nicel değerlendirme süzgecinden geçirilmesiyle mümkündür. Son yıllarda bu alandaki sonlu eleman çalışmaları daha çok ayırık tekniği benimsemiş ve çatlak yüzeylerindeki çatlağın ilerlemesinden sorumlu olan çatlak açılma ve kohezif kapanma gerilmeleri dengesini esas alan alternatif modeller üretmiştir. Bu anlayış, kohezif davranış yaklaşımının bir anlamda hammaddesidir.

Bu çalışma, belirtilen esaslardan yola çıkarak, çatlak oluşumunu alternatif bir şekilde sonlu eleman metodolojisinde çatlak yüzeylerindeki kohezif davranış çerçevesinde anlatmayı amaçlamıştır. Örnek olarak üç noktalı eğilme deneyi altında basit kiriş eleman seçilmiştir. Elemanın A0, A1 ve A2 adlı üç farklı sonlu eleman modeli ABAQUS programında hazırlanmıştır. A0 çatlak oluşumunun gözönüne alınmadığı karşılaştırma modeliyken, A1 ve A2 modellerinde çatlak oluşumu, ayırık teknik esas alınarak eleman geometrisinde oluşturulmuştur. Çalışma kabulleri kapsamında sadece eleman açıklığının ortasında ilk oluşan eğilme çatlağı geometrisi idealize edilerek sisteme adapte edilmiştir. Çalışmanın önerdiği A1 modeli kohezif davranış prensibi ile oluşturulmuştur. A1 modelinde çatlak geometrisi boyunca arayüzey etkileşimi (interaction) oluşturulmuştur. Bu arayüzey kapsamında kullanılan modüller, "Hasar" ve "Kohezif" davranış modülleri olup bu kısımda çatlak oluşum kriteri ve betonun çekme yumuşaması davranışı girilmiştir. A2 modeli ise tipik bir XFEM uygulama örneği olup, çalışma kapsamında önerilen A1 modeli sonuçlarını yorumlama ve değerlendirme adına hazırlanmıştır.

A1 ve A2 model sonuçlarının yük-deplasman ve yük-çatlak ağız açılma deplasmanlarının çok yakın olması, bunun yanısıra iki yöntemin de sunduğu nihai çatlak profillerinin çakışması, A1 modelinde kullanılan yaklaşımın, XFEM tekniğine kuvvetli bir alternatif olabileceğini kanıtlamaktadır. Bu bağlamda çalışmada sunulan A1 yaklaşımının en önemli yanının, çatlak davranışını anlatırken, betonun çekme yumuşamasındaki karakterini, birebir olarak çatlak arayüzeyindeki kohezif davranışa indirgemesi olduğu vurgulanmalıdır. Her ne kadar çatlak profillerinin etrafındaki gerilme dağılımında farklılıklar gözlense de çoklu çatlak tanımlaması ile bunun aşılacağı düşünülmektedir.

İleride bu alanda yapılan araştırmalar için düşünülen noktalar, çalışmada önerilen arayüzey kohezif davranış yaklaşımı göz önüne alınarak, çoklu çatlak tanımlaması yapılan elemanların çözülmesi ve daha sonra çoklu çatlak etkileşimlerinin yine aynı yaklaşımla incelenmesidir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ABAQUS, 2018, *Version 6.14 User Manual*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Incorporation, Powtucket, Rhode Island, A.B.D.
- Akkaya, Y., 2006, *Düzlem Gerilme Altında Betonarme Elemanların Doğrusal Olmayan Davranışının Sonlu Eleman Yöntemiyle İncelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bhowmick, S., Liu, G. R., 2018, "A phase-field modeling for brittle fracture and crack propagation based on the cell-based smoothed finite element method", *Engineering Fracture Mechanics*, Cilt 204, ss. 369-387.
- Chang, G.A., Mander, J.B., 1994, *Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I – Evaluation of seismic capacity*, State University of New York, NCEER Teknik Raporu, 43-61, A.B.D.
- De Borst, R., Remmers, J. J. C., Needleman, A., Abellan, M. A., 2004, "Discrete and smeared crack models for concrete fracture: bridging the gap", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Cilt 28, No 7-8, ss. 583-607.
- Dias da Costa, D., Graça e Costa, R., Ranzi, G., Smith, S.T., 2018, "Assessment of the behavior FRP-strengthened RC slabs using a discrete crack model", *Journal of Composites for Construction*, Cilt 22, No 6, ss. 1-14.
- Dirik, H., Yalçinkaya, T., 2018, "Crack path and life prediction under mixed mode cyclic variable amplitude loading through XFEM", *International Journal of Fatigue*, Cilt 114, ss. 34-50.
- Hillerborg, A., Moder, M., Peterson, P.E, 1976, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement and Concrete Research*, Cilt 6, ss. 773-782.
- Islam, M. R., Vallejo, M. J., Tarefder, R.A., 2017, "Crack Propagation in Hot Mix Asphalt Overlay Using Extended Finite-Element Model", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Cilt 29, Sayı 5, ss. 162-196.
- Jendele, L., Cervenka, J., Saouma V., Pukl, R., "On the choice between discrete or smeared approach in practical structural FE analyses of concrete structures", *Fourth International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation*, Glasgow, 234-248, 6-8 Haziran 2001.
- Maekawa, K., Okamura, H., Pimanmas, A., 2003, *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Taylor&Francis Press, New York, A.B.D.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R., 1988, "Theoretical stress-strain model of confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, Cilt 114, Sayı 8, ss. 1804-1826.
- Nikolic, M., Do, X., İbrahimbegovic, A., Nikolic, Z., 2018, "Crack propagation in dynamics by embedded strong discontinuity approach: Enhanced solid versus discrete lattice model", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Cilt 340, ss. 480-499.
- Ors, D., Okail, H., Zaher, A., 2014, "Modeling of shear deficient beams by the mixed smeared/discrete cracking approach", *Housing and Building National Research Center Journal*, Cilt 12., ss. 123-136.
- Patil, R. U., Mishra, B. K., Singh, I. V., 2019, "A multiscale framework based on phase field method and XFEM to simulate fracture in highly heterogeneous materials", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Cilt 100., ss. 390-415.
- Pham, D. C., Cui, X., Lua, J., Zhang, D., "A continuum damage description for a discrete crack modeling approach for delamination migration in composite laminates", *AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures: Structural Dynamics and Materials Conference*, Florida, 1-13, 15 Haziran 2018.
- Pommier, S., Gravouil, A., Combescure, A., Moës, N., 2011, *Extended Finite Element Method for Crack Propagation*, Wiley Publications, New Jersey, A.B.D.
- Saloustros, S., Pelà, L., Cervera, M., 2015, "A crack-tracking technique for localized cohesive-frictional damage", *Engineering Fracture Mechanics*, Cilt 150, ss. 96-114.
- Shi, Z., 2009, *Crack Analysis in Structural Concrete: Theory and Applications*, Butterworth and Heinemann Press, New York, A.B.D.

- TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- Tort, C., Hajjar, J.F., 2004, "Damage assessment of rectangular concrete-filled steel tubes for performance-based design", *Earthquake Spectra*, Cilt 20, Sayı 4, ss. 1317–1348.
- Yun, K., Wang, Z., He, L., Liu, J., 2018, "A damage model based on the introduction of a crack direction parameter for FRP composites under quasi-static load", *Composite Structures*, Cilt 184, ss. 388-399.



SHAKING TABLE EXPERIMENTS ON MASONRY BUILDING PROTOTYPES PRODUCED WITH DIFFERENT BOND

¹Fatih BAHADIR , ²Fatih Süleyman BALIK 

Necmettin Erbakan University, Ereğli Kemal Akman High Vocational School, Ereğli, Konya, TURKEY

¹ fbahadir@erbakan.edu.tr, ² fsbalik@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 09.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 14.01.2021)

ABSTRACT: The major damages that occurred due to the earthquake are the formation of shear cracks and sliding cracks in the plane of the walls, the overturning of the walls out-of-plane, the separation of the walls from the corners and slabs. In this study, prototype masonry buildings were produced with different bonds 1/6 geometric scale, one story and three-compartment were tested on the shaking table. These prototype masonry buildings were tested on a shaking table with sinusoidal dynamic testing. The walls of test specimens were produced with the cross, the flemish, the english, and the dutch bond, respectively. The behaviour of test specimens, displacement, elastic seismic loads were compared by giving the same ground motion to the specimens. Displacement measurements of the test specimens were made by the image processing method and acceleration data were measured by accelerometers. In the experimental studies, different types of failure modes and cracks that could occur during the earthquake were observed. In the shaking table, the maximum elastic seismic load has occurred at Specimen 4 (dutch bond). Because Specimen 1 had more rigid compared to the other specimens, Specimen 1 with cross bond also occurred the highest seismic performance. As a result, all masonry structures that are not carefully manufactured and do not receive engineering services, regardless of the type of the bond, cannot exhibit sufficient earthquake performance. As a result, for the masonry buildings stated in TBSC-2018, vertical lintels can be made on the sides of the door and windows, or the door and window spaces can be made smaller, which can make an important contribution to the seismic performance of masonry buildings.

Key Words: Shaking Table, Failure Mechanism, Masonry Buildings, Bond Type, Elastic Seismic Load, Response spectrum

Farklı Duvar Örgüleri ile Üretilmiş Prototip Yığma Binaların Sarsma Tablası Deneyleri

ÖZ: Deprem nedeniyle meydana gelen en büyük hasarlar, duvar düzleminde kesme ve kayma çatlaklarının oluşması, duvarların düzlem-dışı dışı hareket etmesi, duvarların köşelerden ve döşemelerden ayrılmasıdır. Bu çalışmada, 1/6 ölçekli, tek katlı ve üç bölmeli farklı duvar örgüleri üretilmiş prototip yığma yapılar sarsma tablası üzerinde test edilmiştir. Bu prototip yığma yapılar sinüzoidal dinamik test ile sarsma tablasında test edilmiştir. Test numunelerinin duvarları sırasıyla haç, flamen, ingiliz ve hollanda tip örgüler ile üretilmiştir. Test numunelerinin davranışları, elastik sismik yükleri ve deplasmanları kıyaslayabilmek için numunelere aynı yer hareketi verilmiştir. Test numunelerinin yer değiştirme ölçümleri görüntü işleme yöntemi ile yapılmış ve ivme değerleri ivmeölçerler ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda deprem sırasında gözlemlenen, farklı tipte göçme modları ve çatlaklar meydana gelmiştir. Sallama tablasında, Numune 4'te (hollanda örgü) maksimum elastik sismik yük oluşmuştur. Numune 1 (haç örgü) diğer örneklere göre deneylerde daha rijit davrandığından dolayı, numune 1 en yüksek sismik performansı ulaşmıştır. Sonuç olarak, özenle imal edilmeyen ve mühendislik hizmeti almayan tüm yığma yapılar, örgü türü ne olursa olsun yeterli deprem performansı gösteremez. TBSC-

2018'de belirtilen yığma binalarda kapı ve pencere kenarlarına düşey lentolar yapılabilir veya kapı ve pencere boşlukları küçültülebilir, bu da sismik performansına önemli katkı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Sarsma tablası, Göçme mekanizması, Yığma binalar, Örgü tipi, Elastik sismik yük, Tepki Spektrumu

1. INTRODUCTION

Masonry buildings are usually constructed using local materials in the rural area and without any engineering service. Therefore, it is possible to find a wide variety of materials and different workmanship in such buildings. As a result, uncertainty and difficulty arise in determining the safety of masonry buildings under earthquake loads. According to TBSC-2018 (Turkish Building Seismic Code, 2018), the maximum number of stories is 4 in Turkey. These buildings usually have hollow brick, briquettes and rarely mud-brick walls and reinforced concrete slabs. The large door and window openings located on the walls of these buildings and close to the corners constitute the weak points of the building.

Masonry buildings are generally quite stiff structures (e.g., a 4-story building usually has a natural vibration period of about 0.25s). Also, the damping ratios are quite low (about 1-2% of damping ratio). However, after the cracks arise, these damping ratios increase over the period. These structures may be damaged or even demolished during earthquakes within short periods. Lateral loads due to earthquakes in masonry structures are distributed to walls in the function of their rigidity, and shear cracks occur on the walls.

Strength in masonry structures is provided by adherence between brick and mortar. As the cracks created by the earthquake increase, the dynamic characteristics of the masonry buildings change, the natural frequency decreases and the displacements increase. As the lateral movement continues, the cracks are interrupted by vertical load and friction, forming independent wall blocks on the wall surface and the movement in the direction of the cracks increases. These cracks occur in regions with high-stress intensity. The cracks at the edge of the door and window are caused by the vertical bending to the wall plane or the shear stresses that occur in the plane direction. In long walls without door and window openings, these loads perpendicular to the wall plane form vertical or diagonal cracks in the horizontal cracks and wall joints in the lower region. The major damages encountered during the earthquake are the formation of shear cracks and sliding cracks in the plane of the walls, the overturning of the walls out-of-plane, the separation of the walls from the corners and slabs (Balendra, 1993, Arya *et al.*, 2014). Different types of failure modes in walls of masonry buildings are shown in Figure 1.

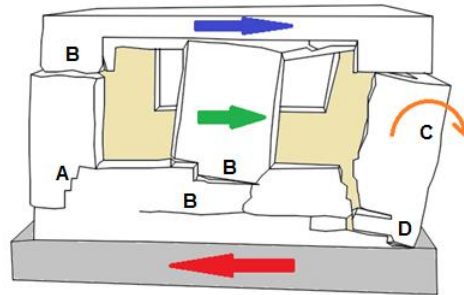
Diagonal Shear Failure: Diagonal shear cracking caused by the maximum tension stress exceeding the tension strength of the wall. Diagonal shear cracks may occur in a stair-stepped manner through the bed-joints or may pass directly through the bricks. The separation of the walls from the joints into vertical or diagonal cracks is due to loads caused by the earthquake at perpendicular to the plane of the wall and the direction of the plane.

Bed-joint sliding – (Sliding failure) Sliding failure is caused by horizontal shear cracks in the bed-joint. When the loads coming from the wall plane exceeds the mortar strength between the bricks. These cracks are caused by the forces in the plane of the wall exceeding the strength of mortar between bricks. Generally, these cracks occur in the horizontal direction of the window and door corners.

Out-of-Plane Behaviour (Overturning): Because of earthquake loads, inertia forces are generated by the mass of the walls. The walls of masonry buildings perpendicular to the direction of the dominant earthquake are usually damaged by out-of-plane behavior. The cause of such damage is that the tops of the walls are not connected by a rigid slab, a ridge, or joists and beams. In times of earthquake, if there is insufficient resistance in the orthogonal walls, these walls push each other out of the plane at the corner, causing damage or even collapse of the walls.

Rocking: The rocking of the wall in the plane begins with the flexural cracks that develop in the upper and lower parts of the wall. As the displacement increases, the wall separating from the slab tries

to rotate in a plane as a rigid body and eventually partially damages the toe region. Toe crushing is typically observed after rocking deformations.



A. Shear crack B. Sliding crack C. Overturning D. Rocking

Figure 1. Failure mechanisms of masonry buildings.

Since 1960, shaking tables have been used for scientific research on earthquake and structural engineering studies (Stephen *et al.*, 1969; Sullivan *et al.*, 2004; Turer *et al.*, 2007; Hanazato *et al.*, 2008; Ersubasi and Korkmaz, 2010; Kamanli and Balik, 2010; Leite and Lourenco, 2012; Rao and Ramesh Babu, 2012; Saito *et al.*, 2013; Başaran *et al.*, 2014; Bahadir *et al.*, 2018). In this study, prototype masonry buildings were produced 1/6 geometric scale, one story and three-compartment were tested on the shaking table. Test specimens were produced with the cross, the flemish, the english, and the dutch bond, respectively. The behaviour of test specimens, displacement, elastic seismic loads were compared by giving the same ground motion to the specimens. Displacement measurements of the test specimens were made by the image processing method and acceleration value were measured by ADXL345 accelerometer. By using these values, it is aimed to make the related graphs and make comparisons.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Description of test specimens

In this experimental study, four one-story, 1/6 scaled, three-compartment masonry building prototypes were tested on the shaking table until the failure mode. Each prototype was built using a different bond type. The used bond types contained deficiencies commonly observed in residential buildings in Turkey. The experiments were manufactured and tested in the Structural Testing Laboratory at the Necmettin Erbakan University–Konya–TURKEY (Figure 2) (Balendra, 1993). All four tested specimens were produced with the same walls geometry and mortar. Specimen 1 was produced with the cross bond. Specimen 2 was produced with the flemish bond. Specimen 3 was produced with the english bond. Specimen 4 was produced with the dutch bond.

The height of one story was 450 mm (2700 mm in 1:1 scale real dimensions). The length of the specimen was 800 mm from one wall to another wall. The slab' dimensions were 800x800 mm and 50 mm thickness. Dimensional of the specimens are shown Figure 3.



Figure 2. General photo of the test set-up for the experimental study

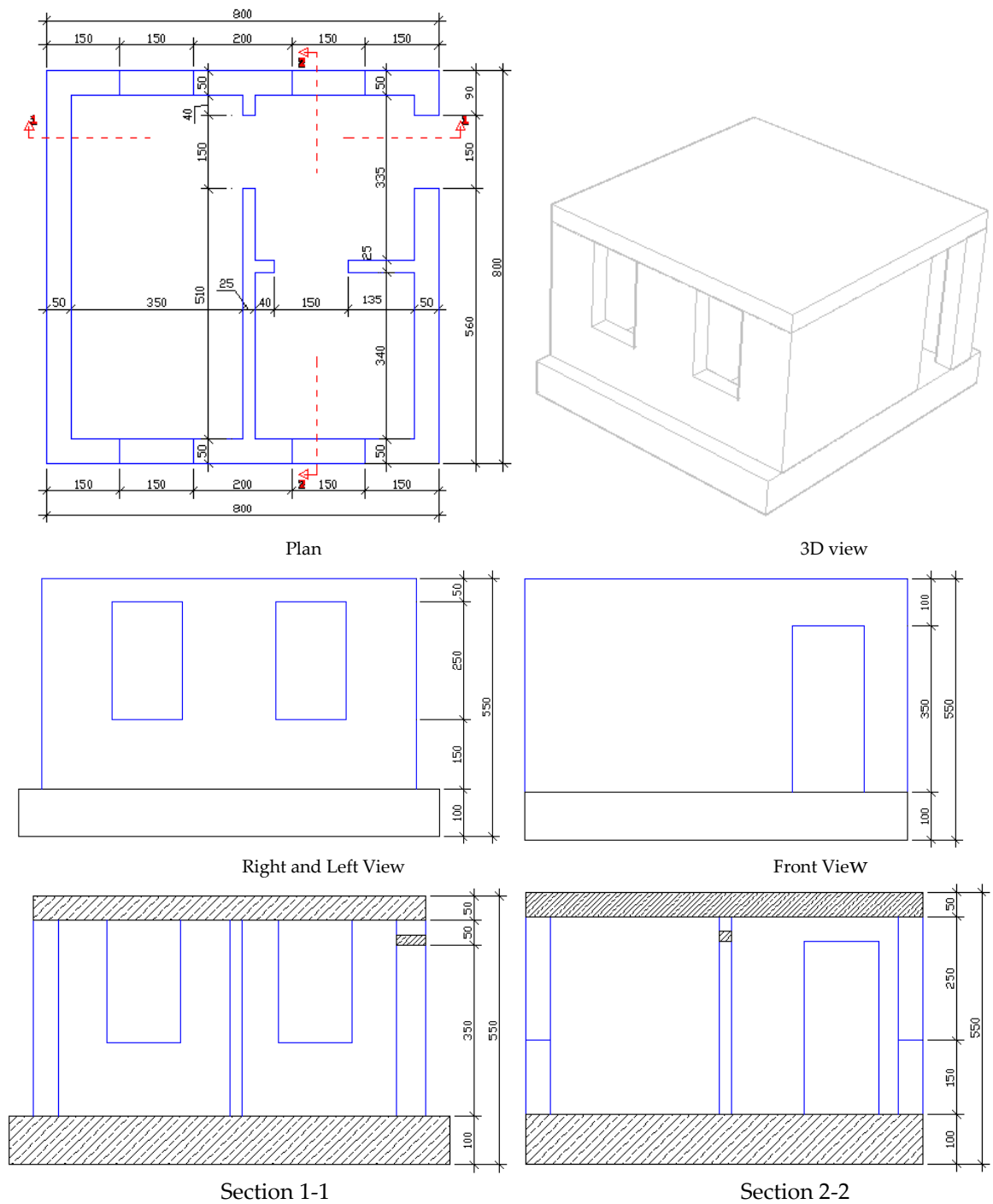


Figure 3. Dimensional details of the general specimen (dimension: mm)

All specimens had 150x250-mm window openings on two faces and one 150x400-mm door opening. The thickness of the outer wall was 50 mm and the thickness of the inner wall was 25 mm. All specimens contained three-compartment. The brick dimensions were 30x50x25 mm. The gypsum-mortar used for the tested specimens was prepared with sand/plaster and water/plaster ratios of 1:2. Production stages of specimens are shown in Figure 4. The different bonds of test specimens are shown in Figure 5.



Figure 4. Production stages of specimens

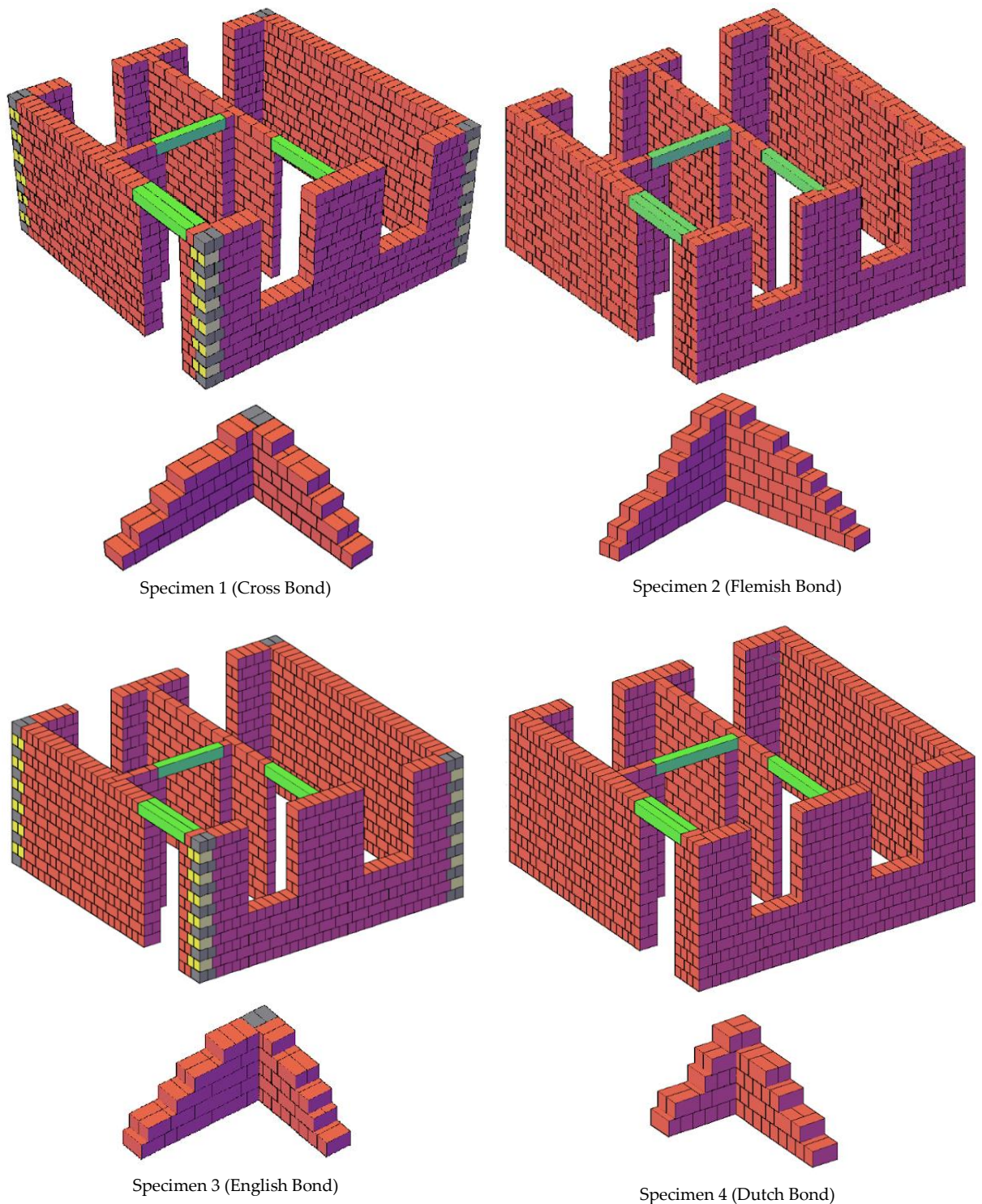


Figure 5. Different bonds of Specimens

In infill brick walls of specimens were tested under diagonal compression (Zimmermann *et al.*, 2012, Bahadir *et al.*, 2015, Bahadir *et al.*, 2018; Bahadir, 2020). Due to the non-homogenous structures of the brick walls, it is very difficult to obtain the modulus of elasticity and Poisson ratio using the test data for brick walls. The average diagonal compressive strength of the infill wall was average about 0.65-0.75 MPa.

The scale factors used for measurements and dimensions of specimens on the shake table are given in Table 1. According to the scale laws obtained from Table 1, the same ground motion was applied to specimens in short time periods and high frequencies.

Table 1. Scale factors for experimental study at shaking tables (Harris *et al.*, 1999; Başaran *et al.*, 2014; Bahadir *et al.*, 2018; Bahadir, 2020).

Parameter	Dimension	Scale Factors
Gravitational acceleration, g	LT-2	1
Velocity, v	LT-1	SI ^{1/2}
Time, t	T	SI ^{1/2}
Linear Dimension, l	L	SI
Displacement, δ	L	SI
Frequency, ω	T-1	SI ^{-1/2}
Area, A	L ²	SI ²
Volume, V	L ³	SI ³
Modulus, E	FL-2	1

2.2. Test Setup

The working principle of the shaking table used in experiments is converted from rotary motion to linear motion. The specimens were tested under constant axial load and sinusoidal cyclic were imposed to simulate the seismic action. This axial load of 980 N was given by the three plates located on top of the specimens. Besides, the sinusoidal cyclics were processed by the DAQ-Card (Labjack-U3) (Labjack, 2015). The acceleration data of ground motion are shown in Figure 6. The test setup for the experimental study is shown in Figure 7.

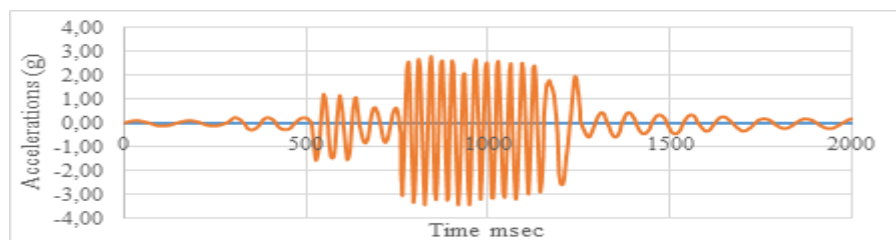
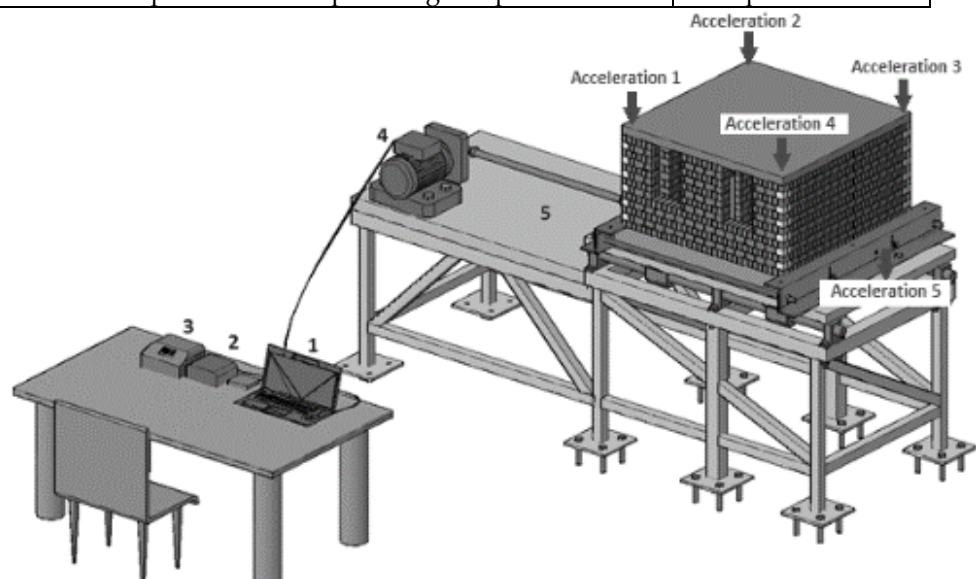


Figure 6. Acceleration data of ground motion

The specimens were tested with a ground motion on the shaking table until failure. Main parameters of the shaking table are given Table 2.

Table 2. Main parameters of shaking table (Bahadir *et al.*, 2018; Bahadir, 2020)

Parameters	Values Units
Size of the platform	80 mm x1200 mm
Maximum mass of load	15kN
Maximum displacement of the platform	± 20 mm
Maximum acceleration of the platform	± 4 g
Frequency	0~50 Hz
Maximum power of motor	4 kW
Maximum output torque of gear speed reducer	100518 mNm
Maximum input rotational speed of gear speed reducer	3000 rpm
Maximum output rotational speed of gear speed reducer	380 rpm



1.Computer 2. Labjack-U3 3. Simatic-G120 4. Motor+ Gear Speed Reducer 5. Shaking Table

Figure 7. Test setup**Figure 8.** Location points of accelerometers and the ADXL 345 accelerometer

Acceleration data of the test specimens were measured with ADXL345 accelerometers in experiments (Figure 7-8). In the experiments, four accelerometers were used on the specimens and one accelerometer on the shaking table. The average of the accelerometers data on the samples was used in the comparisons. The ADXL345 is a complete 3-axis acceleration measurement system with a selectable measurement range. ± 4 g measurement range was selected in the experiments. It measures both dynamic

accelerations resulting from motion or shock and static acceleration (ADXL345, 2009). The shake table accelerations were measured at X-direction.

Displacements were calculated using the image processing method. The displacements were measured from the left and the right faces of the prototype structure. The displacements in the experiments were calculated using the Image-Pro v.6 demo version (Image Pro). The camera was calibrated for displacement calculation by image processing before each experiment was performed. These experimental studies have occurred with ± 1 mm margin. A background subtraction method was used for image processing. The application stage of this method is given in Figure 9. This method was used to compare the active image to the background image, and pixels deemed to be part of the background were replaced with a value close to the mean background intensity. The algorithm is based on the following formula:

$$CI_{x,y} = I_{x,y} - BI_{x,y} + M \quad (1)$$

$I_{x,y}$ is a pixel value of the original image at the location (x,y);

$BI_{x,y}$ is a pixel value of the background image at the location (x,y);

M is the average pixel value of the background image;

$CI_{x,y}$ is the new pixel value in the corrected image.

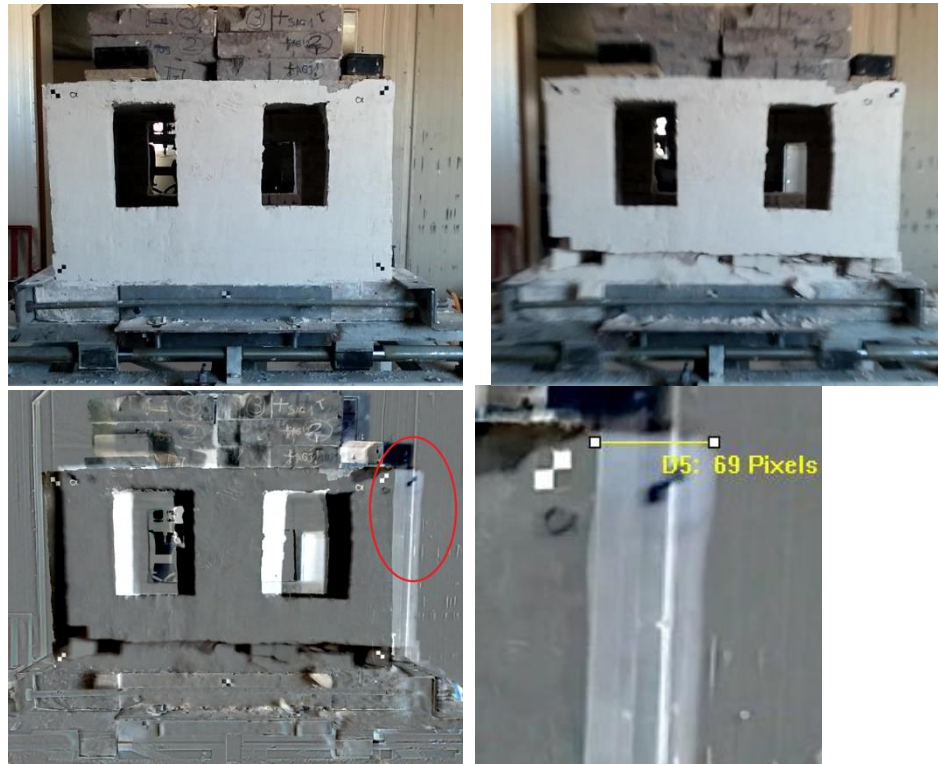


Figure 9. The background subtraction method

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Experimental results

Acceleration data of test specimens on the 1st story level at X-direction were measured. The measured acceleration data (Balendra, 1993) of Specimen 1, Specimen 2, Specimen 3, and Specimen 4 are shown in Figure 10, Figure 11, Figure 12, and Figure 13, respectively. First cracks and damages at the failure modes of Specimen 1, Specimen 2, Specimen 3, and Specimen 4 are shown in Figure 14, Figure 15, Figure 16, and Figure 17, respectively.

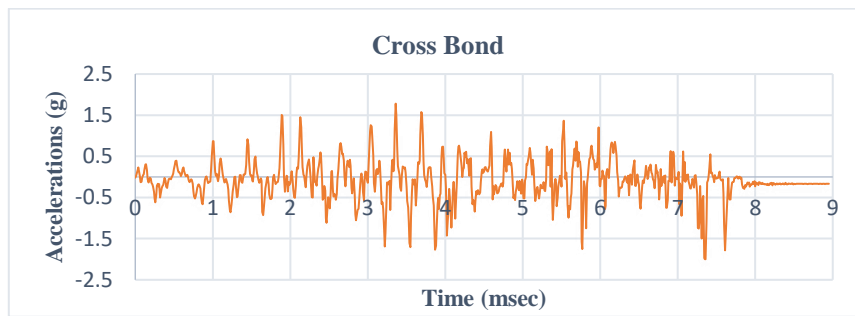


Figure 10. Acceleration data of Specimen 1

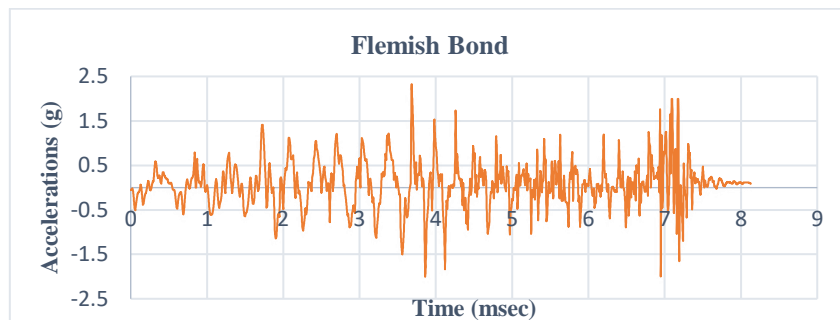


Figure 11. Acceleration data of Specimen 2

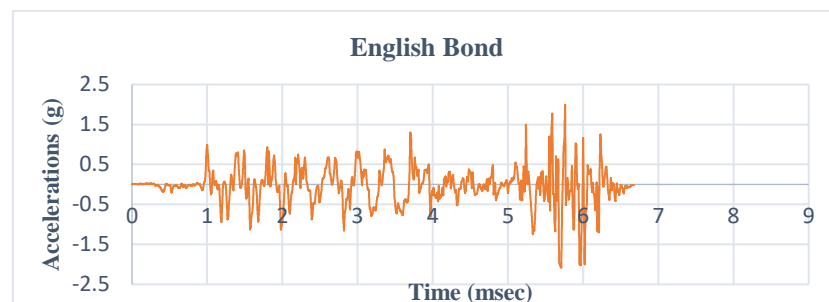


Figure 12. Acceleration data of Specimen 3

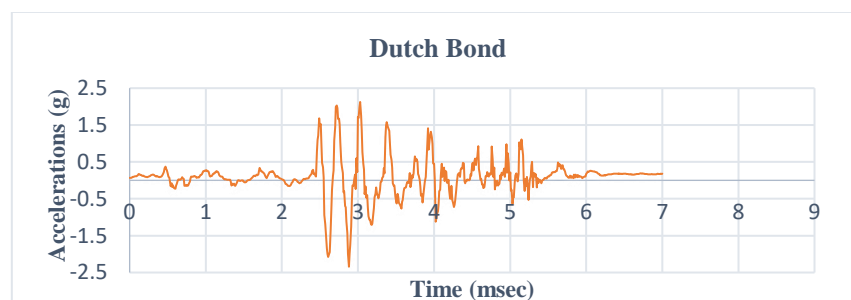


Figure 13. Acceleration data of Specimen 4

In the experimental studies, different types of failure modes and cracks that could occur during the earthquake were observed. The shear and sliding cracks occurred at the windows and door corners. The out-of-plane behavior occurred at the orthogonal wall of the earthquake direction and the walls below the window. The wall between the two windows separating from the slab tried to rotate in a plane and this wall collapsed as out-of-plane. The first cracks of all specimens occurred near the base of the wall (under the windows) as sliding crack. The crack formations of Specimen 1 and Specimen 2 were observed similar. The reason for the longer failure duration of Specimen 1, the first crack occurred later than the other specimens. In addition, the first cracks of Specimen 1, Specimen 2, Specimen 3, Specimen 4 occurred at 4.55 sec, 2.29 sec, 3.37 sec, and 3.57 sec as sliding cracks, respectively. The shear cracks and other type

cracks that cause collapse of Specimen 1, Specimen 2, Specimen 3, and Specimen 4 were also begun at 5.39 sec, 4.84 sec, 3.77 sec, 3.92 sec, respectively. According to the obtained results, Specimen 1 and Specimen 2 were more reliable than the other specimens because first and second rows of brick members of these specimens were designed perpendicular to each other at long walls. Due to this design, Specimen 1 and Specimen 2 were later collapsed as other specimens.



Figure 14. Cracks and damage were observed at the Specimen 1

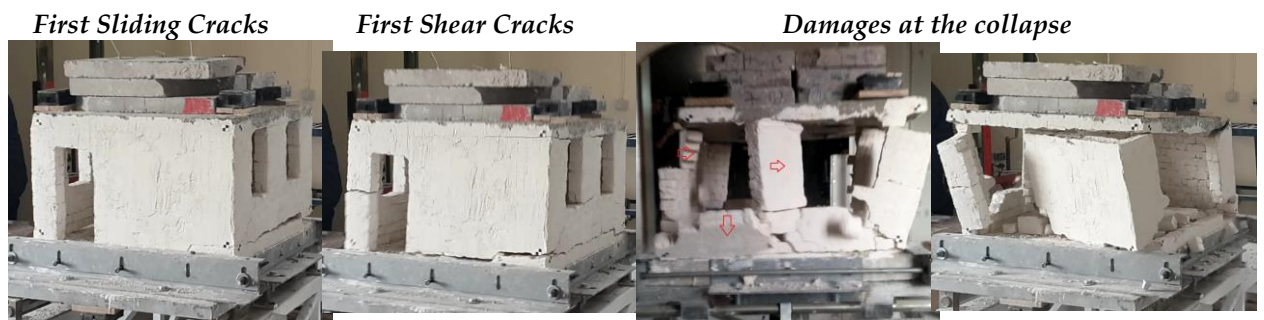


Figure 15. Cracks and damage were observed at the Specimen 2

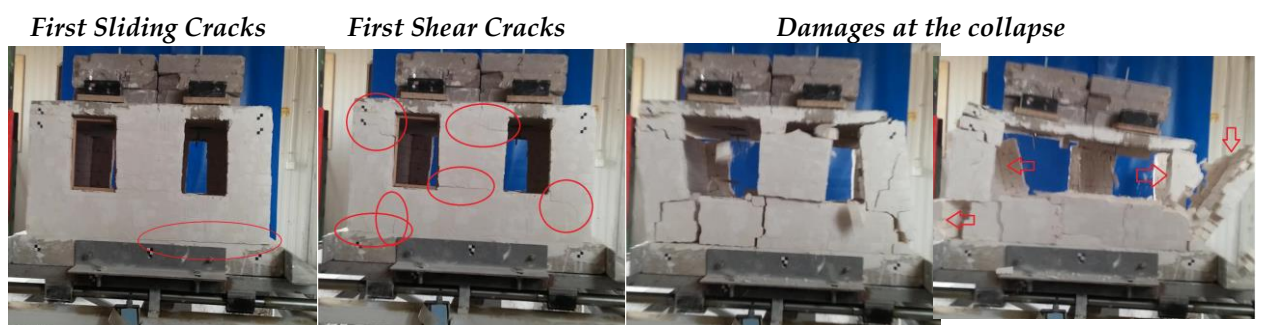


Figure 16. Cracks and damage were observed at the Specimen 3

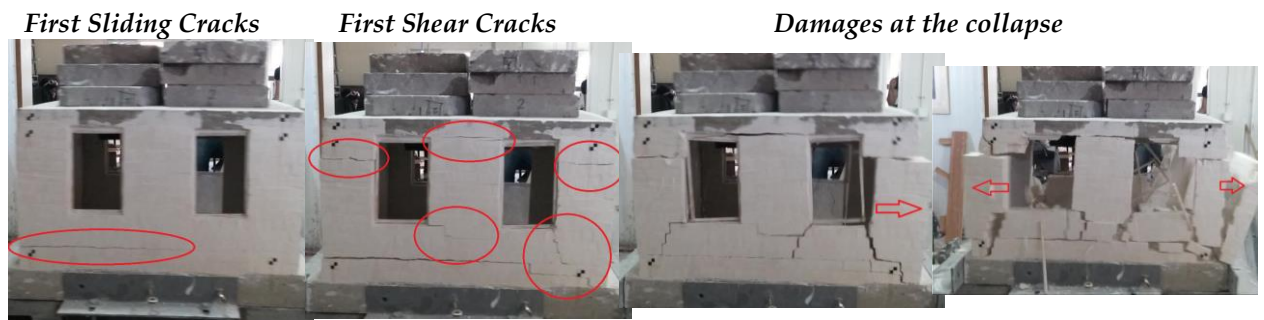


Figure 17. Cracks and damage were observed at the Specimen 4

4. COMPARISON of TEST RESULTS

The purpose of the measurement of earthquake motion is to measure acceleration as a function of time or frequency and to observe the behaviors of structures during an earthquake. For this reason, acceleration records constitute an important database for engineering applications and scientific studies.

4.1. Response Spectrum

The building exposed to earthquake loads first vibrates during the period that it is subjected to earthquake and then by its own period. If the members of the building do not have damping properties, resonance occurs in the building and causes the building to collapse. The basic items that reduce the period of the building are the weight of the building and irregularities in the building. The exposure of a building to earthquakes at different times can cause the building's period to be greater in the next same magnitude of the earthquake. Because of the vibrations in different periods during the earthquake, the behavior of the building is called the Earthquake Spectrum Graph, which shows the characteristics of the behavior in terms of maximum displacement, acceleration, and velocity. Since Response Spectrum method is useful for approximate evaluation of seismic reliability of structures, this method is favored by earthquake engineering (Balendra, 1993). These graphs of the test specimens are given in Figure 18.

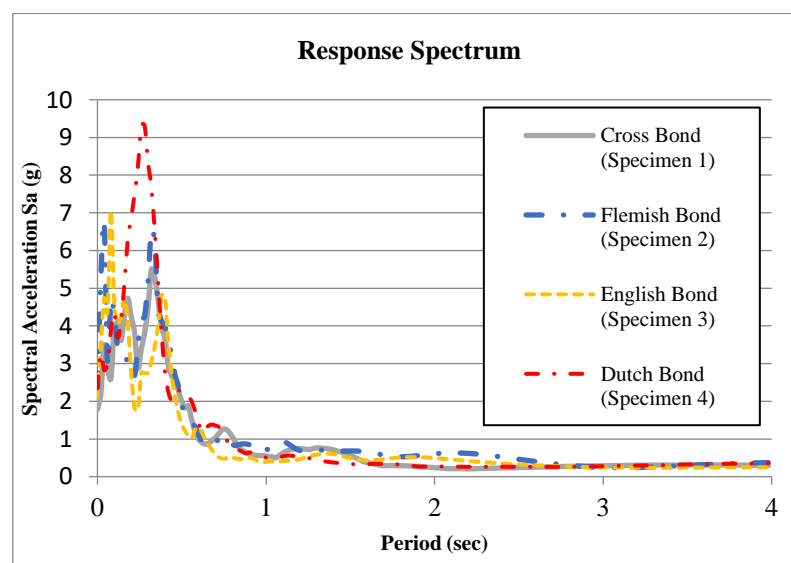


Figure 18. The response spectrum graphs of test specimens by 5% damping.

In the analysis of the dynamic behavior of buildings, each earthquake has its own unique acceleration spectrum. According to the natural period and damping rate of the building, the maximum response value obtained from the acceleration response spectrum is the absolute acceleration value which influences the building (Balendra, 1993).

According to the acceleration response spectrums, Specimen 4 occurred to the highest accelerations compared to the other specimens. In addition, Specimen 4 was measured to the largest mean period compared to the other specimens. The mean natural period of Specimen 1 was calculated as 0.276 sec, Specimen 2 was calculated as 0.30 sec, Specimen 3 was calculated 0.266, and Specimen 4 was calculated also as 0.324 sec. The greater the period value, the greater the amount of damage. In addition, the specimens with a low natural period are more rigid. Specimen 1 has more rigid compared to the other specimens.

4.2. Displacement of Story

The displacements were measured from the left and the right faces of the test specimens. At the left face, the maximum displacement of Specimen 1 was measured as -74 mm at 7.68 sec, Specimen 2 was measured as -52 mm at 4.63 sec, Specimen 3 was measured as -69 mm at 4.43sec, and Specimen 4 was also measured -32 mm at 4.43 sec (Figure 19). At the right face, the maximum displacement of Specimen 1 was measured as -68 mm at 7.35 sec, Specimen 2 was measured as -76 mm at 4.98 sec, Specimen 3 was measured as -51 mm at 4.43sec, and Specimen 4 was also measured -36 mm at 4.43 sec (Figure 20). At all specimens, the maximum displacements occurred as a negative value. At the maximum displacement of the shaking table, the maximum displacements due to the inertial force of the specimens were measured at negative values. That is, the maximum displacements were formed in the opposite direction to the movement of the shaking table.

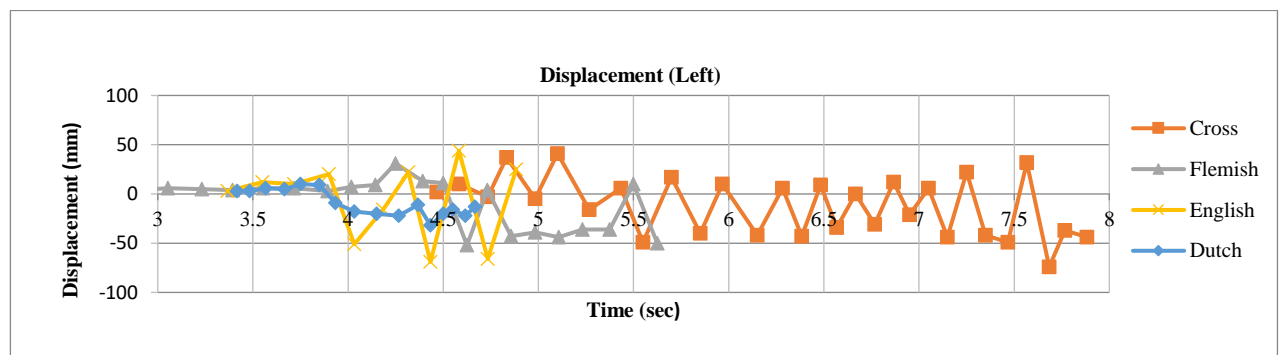


Figure 19. Max displacement of all specimens (left face)

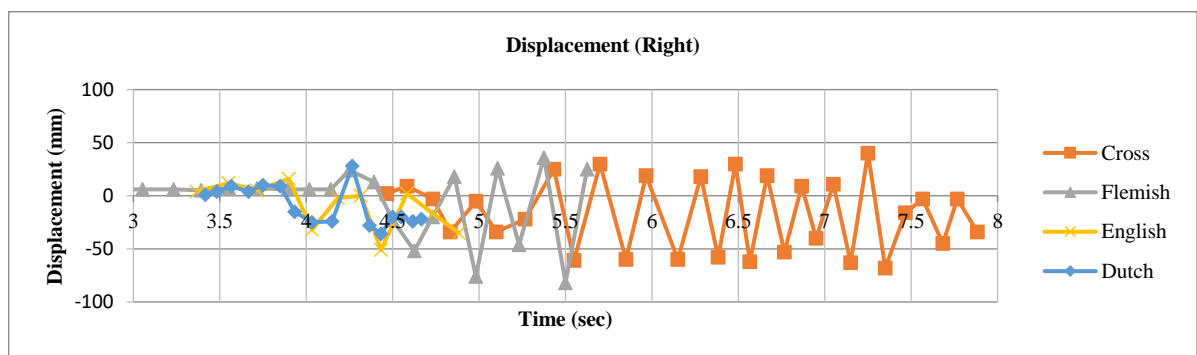


Figure 20. Max displacement of all specimens (right face)

4.3 Elastic Seismic Load

In the analysis of the dynamic behavior of buildings, each earthquake has its own unique acceleration spectrum (Balendra, 1993; Bahadir, 2020). According to the natural period and damping rate of the building, the maximum response value obtained from the acceleration response spectrum is the absolute acceleration value which influences the building. This spectrum is the envelope curve plotted from the peaks of maximum acceleration with the corresponding vibration time (T) of each of single-degree-of-freedom systems. In the spectrum to be used in the calculation of inertia force of the internal forces formed in the structure, the acceleration value to be used is not the total acceleration value ($\ddot{u}(t) + \ddot{u}_g(t)$), but the acceleration value ($\omega^2 SD$) at maximum displacement. This acceleration is called Pseudo Acceleration and this spectrum is called Pseudo Spectral Acceleration (Balendra, 1993). The relationship between pseudo-spectral acceleration and spectrum displacement is given in Equation 2. Under the influence of seismic activities, the building carrier system must be able to withstand at least this elastic seismic load (Equation 3). If the masses of the specimens are approximately the same, these values can be used as a comparison.

$$PSA = \omega^2 \cdot SD \quad (2)$$

$$F_{el} = m \cdot PSA \quad (3)$$

$u(t)$: Displacement (u) at the (t) time

$u_g(t)$: Relative displacement (u_g) at the (t) time

ω : Angular frequency

SD : Spectral Displacement

PSA : Pseudo Spectral Acceleration (g)

m : Mass

F_{el} : Elastic seismic load

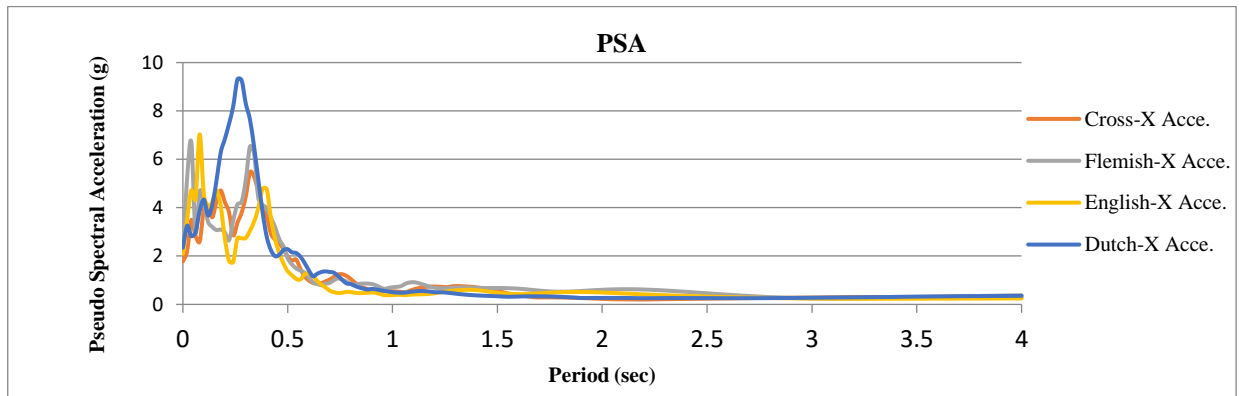


Figure 21. The Response Pseudo Spectral Acceleration graphs of test specimens by 5% damping.

According to the PSA data obtained from the experiments (Figure 21), Specimen 4 subjected to the highest elastic seismic load compared to the other specimens. This shows that this specimen did not provide the required seismic performance compared to other specimens. Specimen 1 provided the highest seismic performance. The elastic seismic loads of Specimen 2, Specimen 3, and Specimen 4 have increased 1.23, 1.29, and 1.7 times more than Specimen 1 (respectively).

5. CONCLUSION

In this study, the 3D-prototype masonry buildings were tested on the shaking table for the dynamic behavior of the structure. The specimens produced as one story, 3D, three-compartment, 1/6 geometric scale and different wall bonds. The specimens were tested with the same ground motion on the shaking table until the failure mode. Specimen 4 with dutch bond was the lowest seismic performance according to both natural period and elastic seismic loads compared to other specimens. Specimen 1 with cross bond also provided the highest seismic performance. This specimen had more rigid compared to the other specimens. Besides, Specimen 4 has reached its latest collapse state compared to other specimens. When the shear and shear cracks in the test specimens are examined, almost the same failure mechanisms have been formed in all specimens.

All masonry structures that are not carefully manufactured and do not receive engineering services, regardless of the type of the bond, cannot exhibit sufficient earthquake performance. As a result, for the masonry buildings stated in TBSC-2018, vertical lintels can be made on the sides of the door and windows, or the door and window spaces can be made smaller, which can make an important contribution to the seismic performance of masonry buildings. In such existing structures, which have not been built window and door vertically lintels, it is necessary to carry out appropriate strengthening applications to achieve the required earthquake performance.

6. Data Availability Statement

All raw data generated or used during the study are available in the DesignSafe-CI repository online in accordance with funder data retention policies. Bahadir, F., (2019-06-07) "Behaviour of Prototype Masonry Buildings Produced with Different Bond on the Shaking Table ". (Bahadir, 2019) DesignSafe-CI. <https://doi.org/10.17603/ds2-fm59-xa94>


7. REFERENCES

- Arya, Anand S., Teddy Boen, and Yuji Ishiyama (2014). Guidelines for earthquake resistant non-engineered construction. UNESCO, 2014.
- ADXL345 Evaluation Board (2009), <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>, 2009
- Bahadir F., Balik F.S., (2015). "Seismic Performance Improvement of 3D Reinforced Concrete Frames with Different Strengthening Applications ", Applied Mechanics and Materials Manufacturing Science and Technology VI Chapter: 8 Civil Engineering, 789-790, 1140-1144. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.789-790.1140
- Bahadir, Fatih, and Fatih Süleyman Balik (2018). "Behaviour of 3D RC frames placed at different angles on shaking table." *Grđevinar*70.03. (2018): 171-186. <https://doi.org/10.14256/JCE.1655.2016>
- Bahadir, F., (2019-06-07) "Behaviour of Prototype Masonry Buildings Produced with Different Bond on the Shaking Table ". DesignSafe-CI. <https://doi.org/10.17603/ds2-fm59-xa94>
- Bahadir F. (2020). "Experimental study on three-dimensional reinforced concrete frames subjected to dynamic loading". *Structures* (24). pp. 835-850 Elsevier. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.045>
- Balendra, T. (1993). "Vibration of Buildings to Wind and Earthquake Loads". Springer-Verlag London.1993. ISBN:978-1-4471-2055-1. doi: 10.1007/978-1-4471-2055-1.
- Başaran, H., Demir, A., Bağcı, M., & Ercan, E. (2014). Shaking table study of masonry buildings with reinforced plaster. doi:10.14256/JCE.1036.2014, pp.625-633, 2014
- Ersubasi, F., & Korkmaz, H. H. (2010). "Shaking table tests on strengthening of masonry structures against earthquake hazard." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(6), 1209. doi:10.5194/nhess-10-1209-2010, 2010

- Hanazato, T., Minowa, C., Narafu, T., Imai, H., Ali, Q., Kobayashi, K., Nakagawa, T. (2008). "Shaking Table Test of Model House of Brick Masonry for Seismic Construction". In Proceedings of 14th World Conference of Earthquake Engineering (14WCEE).
- Harris, Harry G., and Gajanan Sabnis (1999). Structural modeling and experimental techniques. CRC press.1999
- Image Pro, <https://mediacy.com/imageproplus>.
- Kamanli, M., & Balik, F. S. (2010). "The behaviour of roof gable walls under the effect of earthquake load". Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(2), 251-263.doi:10.5194/nhess-10-251-2010, 2010.
- Labjack U3-HV (2015), <https://labjack.com/support/datasheets/u3>, 2015.
- Leite, J. C., & Lourenco, P. B. (2012). "Solutions for infilled masonry buildings: shaking table tests". In 15th International Brick and Block Masonry Conference (pp. 1-10). Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- Rao K. N., Ramesh Babu R. (2012). "Assessment of Seismic Performance of Reinforced SMB Masonry Building Models through Shock Table and Shaking Table Tests ", CiSTUP Indian Institute of Science, Bangalore.
- Saito T., Moya L., Fajardo C., and Morita K. (2013). "Experimental Study on Dynamic Behavior of Unreinforced Masonry Walls ", Journal of Disaster Research, 8(2).
- Stephen, R. M., Bouwkamp, J. G., Clough, R. W., & Penzien, J. (1969). "Structural Dynamic Testing Facilities at the University of California, Berkeley". Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- Sullivan, T. J., Pinho, R., Pavese, A. (2004), "An Introduction to Structural Testing Techniques". Earthquake Engineering Research Report Rose School, 1.
- Turer, A., Korkmaz, S. Z., & Korkmaz, H. H. (2007). "Performance improvement studies of masonry houses using elastic post-tensioning straps". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 36(5), 683-705.
- Turkish Building Seismic Code (2018) (Ankara: Prime Ministry, Disaster and Emergency Management Presidency (AFAD)) 2018.
- Zimmermann, Thomas, and Alfred Strauss (2012). "Masonry and Earthquakes: Material properties, Experimental testing and Design approaches." Earthquake-Resistant Structures-Design, Assessment and Rehabilitation. InTech, 2012.



YENİ TİP KORONAVİRÜS COVID-19 SALGINININ PETROL VE DOĞAL GAZ SONDAJ SEKTÖRÜNE ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa Hakan ÖZYURTKAN 

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Petrol ve Doğal Gaz Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
ozyurtkan@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 07.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.01.2021)

ÖZ: 2019 yılı Aralık ayında Çin'in Wuhan şehrinden çıkıp dünya genelinde bir salgına sebep olan yeni tip koronavirus Covid-19 insanların günlük yaşamını, sanayi ve üretim çarklarını ve ülkelerin ekonomilerini olumsuz etkilemektedir. Salgından etkilenen sektörlerin başında enerji sektörünün öncü kolu olan petrol ve doğal gaz sektörü gelmektedir. Yaşanan değişimler petrol ve doğal gaz talebinde ciddi düşüşlere ve bu durum petrol fiyatlarında dramatik azalmalara sebep olmuştur. Petrol fiyatlarının etkilediği kolların başında arama ve sondaj gelmektedir.

Bu çalışma; Covid-19 salgınının sebep olduğu gündelik hayattaki, sanayi ve üretimdeki değişikliklerin petrol ve doğal gaz sondaj sektörüne olan etkisinin değerlendirilmesini içermektedir. Salgın sebebiyle oluşan gündelik hayat, trafik ve seyahatlerdeki değişimlerle birlikte, sanayideki tüketim ve elektrik tüketimindeki değişimler de göz önünde bulundurularak petrol ve doğal gaz talebinde neden olduğu azalmalar değerlendirilmiştir. Bu talep azalmasının sonucu olarak dünya genelinde sondaj ve arama faaliyetlerinde ciddi oranda düşüşler yaşandığı belirtilmektedir. Salgının dünya genelindeki gidişatına göre sondaj ve arama faaliyetlerinde olabilecek farklı senaryolar sunulmaktadır. Gerek salgının kontrol altına alınma durumunun, gerekse olası tedavi ve aşı çalışmaları sonuçlarının ekonomilere, petrol fiyatlarına ve petrol ve doğal gaz sondaj faaliyetlerine olası etkileri incelenmiştir. Salgının devamlılığı ile ilgili farklı senaryolar yer almaktadır. Bu senaryolar sonucunda petrol ve doğal gaz sondaj sektörünün aktivite olarak salgın öncesi döneme dönmemesinin zaman alacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Petrol ve Doğal Gaz, Sondaj, Covid-19 Salgını*

Assessment of the Impact of the New Type of Coronavirus Covid-19 Outbreak on the Oil and Gas Drilling Industry

ABSTRACT: The new type of coronavirus Covid-19, which left China's Wuhan City in December 2019 and caused an epidemic worldwide, adversely affects the daily life of people, industry and production wheels and economies of countries. The petroleum and natural gas sector, which is the leading branch of the energy sector, is among the sectors affected by the epidemic. The changes have caused serious decreases in oil and natural gas demand, which has caused dramatic decreases in oil price. Exploration and drilling are at the major division affected by the change in the oil price.

This study includes the evaluation of the impact of changes in daily life, industry and production caused by the Covid-19 outbreak on the oil and gas drilling sector. Along with the changes in daily life, traffic and travel caused by the epidemic, the reductions in oil and natural gas demand were evaluated by considering the changes in their consumptions and electricity consumption in the industry. As a result of this decrease in demand, it is stated that there has been dramatic decrease in drilling and exploration activities worldwide. According to the course of the epidemic around the world, different scenarios that may be involved in drilling and exploration activities are presented. The effects of both the control of the epidemic and the results of possible treatment and vaccination studies on economies, oil prices and oil and gas

drilling activities were examined. There are several scenarios about the course of pandemic. As consequences of these scenarios, it can be inferred that it could take time for the activities in oil and gas drilling sector to return back to pre-pandemic conditions.

Key Words: Oil and Natural Gas, Drilling, Covid-19 Outbreak

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çin'in Wuhan kentinde 2019 yılı sonunda başlayan ve tüm dünyaya yayılan yeni tip koronavirüs Covid-19 olarak adlandırılan salgın, dünya genelinde günlük yaşamı olumsuz etkilemiştir. Normal yaşam döngülerinden uzaklaşan ülkeler ve milletlerin salgın sürecinde yaşam şartları değişmiştir. Salgın sonrasında da olası olarak bu değişikliklerin bir kısmının devam edebileceği ön görülmektedir. Gerek ülkelerin, gerek insanların gerekse şirketlerin bu değişikliklere ayak uydurması aşamasında pek çok sektör bu durumdan etkilenmiştir. Etkilenen bu alanların başında da enerji sektörü gelmektedir. Bu çalışma Covid-salgınının enerji sektörünün en önemli kolu olan petrol ve doğal gaz sektörü ve özellikle sondaj alanında aktivitelerin ilerleyen dönemlerde nasıl olabileceğinin ortaya konması hedeflenmektedir.

DEĞERLENDİRME (ASSESSMENT)

Enerji, günümüzde pek çok farklı alt kategoriye ayrılrsa da halen sektöre liderlik eden enerji kolu petrol ve doğalgazdır (World energy outlook report, 2019). Dolayısıyla bu salgının sektörel olarak özellikle petrol ve doğal gaz sektörünü etkilediği söylenebilir ki; bunun pek çok sebebi vardır.

Bu sebeplerden birincisi; farklı ülkelerde uygulanan kısmi veya genel olmak üzere sokağa çıkma yasağı ve normal hayat işleyişinde yapılan kısıtlamalardır. Bu kısıtlamalar sonucunda insanlar normal hayat döngülerinde kullandıkları araçları kullanmamakta, gerek şehirler arası gerek ülkeler arası seyahat vs. mümkün olmamaktadır. Bu duruma bir örnek olarak Çizelge 1'de 20 Mart 2020 ile 30 Mart 2020 tarihleri arasında farklı kıta ve bölgelerdeki normal trafik seviyelerine göre gözlemlenen trafik yoğunluğu değişim oranları görülmektedir (Covid-19 report of Rystad Energy, 2020). Bu dönemin başlangıcında küresel trafik % 25 azalmıştır. 30 Mart 2020 tarihindeki verilere bakılır ise, yine trafikteki düşüşün arttığı ve % 35'e kadar çıktığı gözlenmektedir. Kullanımlar, benzer şekilde izleyen dönemler içinde düşüş göstermeye devam etmektedir.

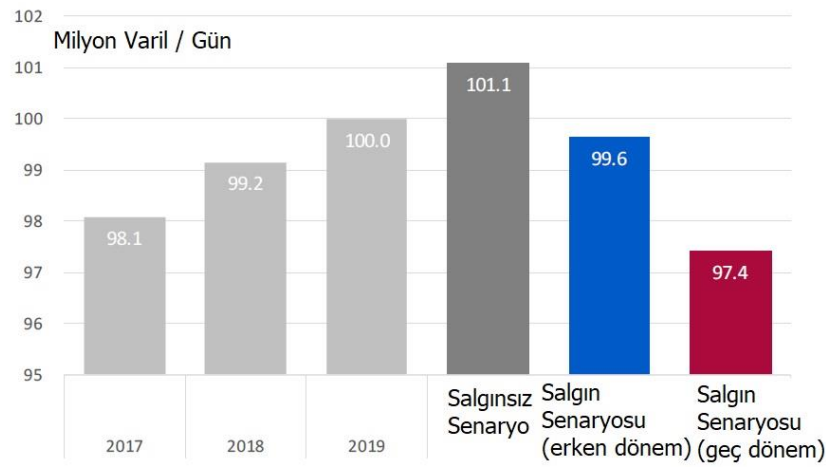
Çizelge 1. Farklı kıta ve bölgelerdeki normal trafik seviyelerine göre gözlemlenen trafik yoğunluğu değişim oranları (Covid-19 report of Rystad Energy, 2020)

Table 1. Traffic density variation observed according to normal traffic levels in different continents and regions

Tarih	Afrika	Kuzey Amerika	Güney Amerika	Asya	Avusturalya	Avrupa	Orta Doğu	Rusya	Toplam
20.03.20	-27	-34	-37	-19	-16	-28	-31	-10	-25
21.03.20	-28	-25	-42	-20	-13	-23	-35	-11	-25
22.03.20	-35	-16	-47	-40	-11	-26	-41	-4	-27
23.03.20	-36	-35	-48	-33	-16	-29	-45	-10	-31
24.03.20	-36	-38	-48	-37	-25	-32	-44	-12	-34
25.03.20	-35	-38	-46	-43	-27	-33	-43	-13	-35
30.03.20	-50	-34	-45	-48	-33	-32	-42	-44	-41
Toplam	-35	-42	-45	-34	-20	-29	-40	-15	-31

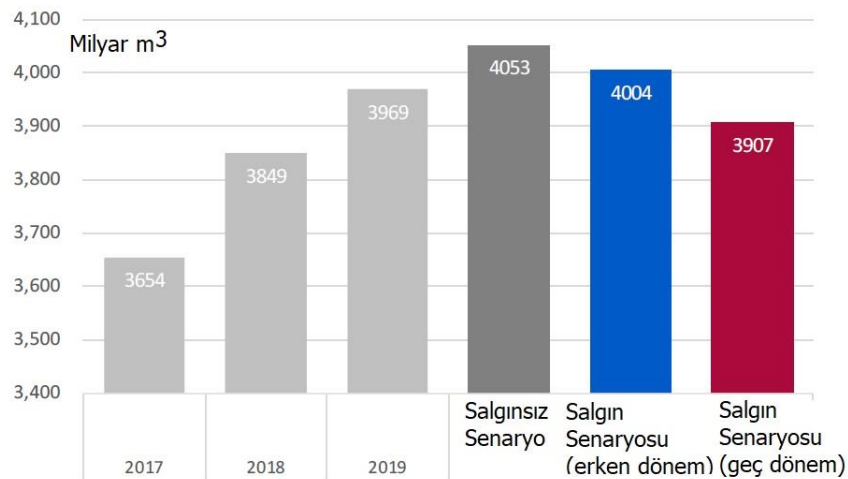
Kullanılan araçların pek çoğunun petrol, doğal gaz ve türevlerini enerji sağlayıcı ana madde olarak kullandıkları düşünülürse bunun sonucu olarak petrol ve doğal gaza olan talep ciddi oranda azalmıştır. Şekil 1 ve Şekil 2'de salgının gidişatı için farklı senaryolar kullanılarak dünya petrol ve doğal gaz talepleri verilmektedir. Covid-19 salgınının olmadığı senaryoya göre günlük petrol talebi 101.1 milyon varil olacağı öngörülmekteydi. Ancak salgının etkisi göz önüne alındığında petrol talebindeki düşüş iki farklı

senaryoya göre incelenmektedir. Bunlar; biri salgının erken dönemde kontrol altına alınabileceği, diğeri geç dönem kontrol altına alınabileceği senaryolarıdır. Salgının erken dönemde kontrole alınabileceği varsayılan senaryoya göre, dünya petrol talebinin günlük 99.6 milyon varile düşeceği öngörülmektedir. Salgının geç dönemde kontrol edilebileceği varsayılan senaryoya göre ise, dünya petrol talebinin günlük 97.4 milyon varile düşeceği öngörülmektedir ki; bu değer üç yıl önceki talebin dahi altındadır. Benzer şekilde doğal gaz talebine göre de projeksiyonlar yapılmaktadır. Covid-19 salgınının olmadığı senaryoya göre, doğal gaz talebinin 4053 milyar kübik metre olacağı öngörülmekteydi. Salgının erken dönemde kontrol altına alınabileceği varsayılan senaryoya göre ise, dünya doğal gaz talebinin 4004 milyar kübik metreye düşeceği öngörülmektedir. Salgının geç dönemde kontrol edilebileceği varsayılan senaryoya göre de, dünya doğal gaz talebinin 3907 milyar kübik metreye düşeceği öngörülmektedir (Koyama ve Suehiro, 2020).



Şekil 1. Farklı senaryolar için olası dünya petrol talepleri (Koyama ve Suehiro, 2020)

Figure 1. Possible world oil demand for different scenarios

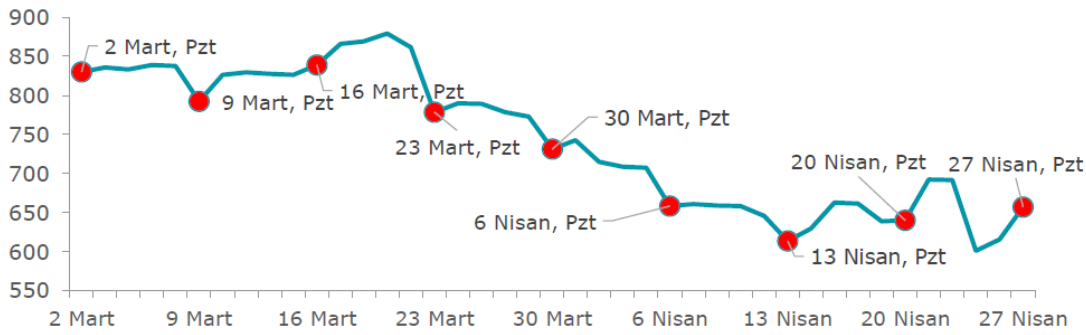


Şekil 2. Farklı senaryolar için olası dünya doğal gaz talepleri (Koyama ve Suehiro, 2020)

Figure 2. Possible world natural gas demand for different scenarios

İkincil sebep olarak yine kısıtlamalardan dolayı hemen hemen her sektörün ve sanayi üretiminin bu salgından etkilenmesi gösterilebilir. Normal hayat döngüsünün değişimi ve insanların tüketim anlayışlarındaki değişimler, talep edilen mallarda ve çeşitliliklerde farklılaşmalara sebep olmuştur. Bu durum da üretim hattı ve zincirinin etkilenmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte, pek çok kişinin aynı anda ve ortamda çalıştığı fabrika ve üretim tesisi gibi ortamlar salgının yayılabilmesi açısından potansiyel görülen yerlerdir. Sağlık açısından, çalışanlarında görülmüş olan vakalardan ve insanların bazı

tüketim mallarına olan taleplerindeki azalmadan dolayı pek çok fabrika ve üretim tesisi üretimlerini azaltmış ya da üretime ara vermiştir. Özellikle doğal gaz tüketiminde sanayi kuruluşları ve fabrikaların tüketimi üst seviyededir. Üretimi azaltmış veya durdurmuş olan bu tesisler doğal gaz talebinin azalmasına sebep olmuştur. Benzer şekilde söz konusu tesislerdeki enerji talebindeki düşüşten dolayı elektrik üretimleri azalmıştır. Bu durum hemen hemen bütün ülkelerde elektrik talebinde azalmaya sebep olmuştur. Ülkemizde de 21 Mart sonrasında elektrik talebi azalmaya başlamıştır. Ay sonuna kadarki dönemde bir önceki yılın aynı dönemine göre talepte yüzde 5'ten fazla düşüş olduğu gözlenmektedir. Nisan ayında da elektrik talebinde bir önceki yılın aynı dönemine kıyasla yüzde 19,5'lik bir azalmaya ulaşılmıştır. 13-17 Nisan haftasında elektrik talebi yüzde 23,2 azalmıştır. Ülkemize ait bu bilgi Şekil 3'te verilmektedir (Türkiye elektrik tüketimi raporu, 2020). Elektrik ihtiyacının da önemli bir kısmının petrol ve doğal gazın yakılarak elde edildiği de göz önünde bulundurulursa; oluşan bu durumun petrol ve doğal gaza olan talebin üzerine olan etkisi daha da fazla olmaktadır.



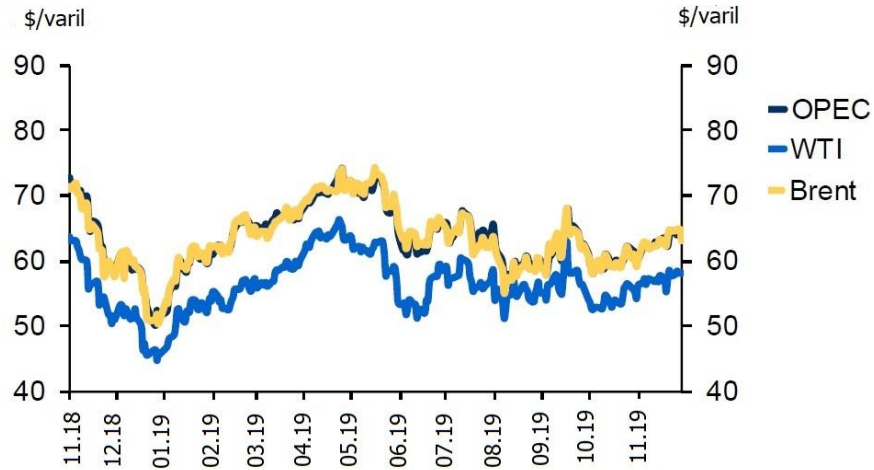
Şekil 3. 2 Mart -24 Nisan 2020 tarihleri arasında hafta içi günlerde elektrik talebi, GWh verilmektedir (Türkiye elektrik tüketimi raporu, 2020)

Figure 3. Working Days electric demand for 2 March – 24 April 2020, GWh

Petrol ve özellikle doğal gaza olan talebin ciddi oranda azalmasının bir diğer sebebi de mevsimsel değişimlere bağlı olan konutsal kullanımlardaki değişimlerdir. Dünya nüfusunun büyük bir kısmı kuzey yarımkürede yaşamaktadır. Bulduğumuz zaman dilimi itibarıyla kuzey yarımkürede yaz dönemine geçiş süreci yaşanmaktadır. Yaz döneminde ve geçiş sürecinde dönemsel olarak doğal gaz ile ısınmasını gerçekleştiren bölgelerde gaz talebi azalmaktadır. Bu durumun direkt olarak salgınla bağlantısı olmamasına rağmen, salgınla ilgili olan diğer etkenler de göz önünde bulundurulduğunda doğal gaz talebine etkisi olmaktadır.

Belirtilen sebepler ile ilişkilendirilebilecek pek çok farklı neden de ortaya konulabilir. Ancak petrol ve doğal gaza olan talebin ciddi oranda azalmasının sebepleri; ana olarak tüketimdeki gerek salgın ile ilişkili gerekse mevsimsel değişimlerden kaynaklanan varyasyonlardır.

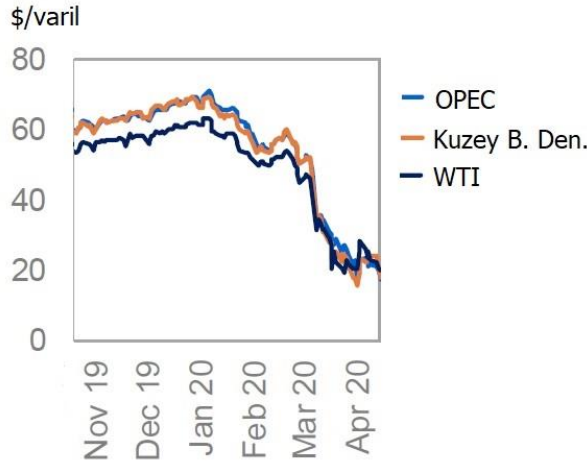
Bu durumların bir arada değerlendirilmesi ancak salgın öncesi verilerin de göz önünde bulundurulması ile söz konusu olabilir. Şekil 4'te görüldüğü üzere 2019 yılı içerisinde özellikle petrol fiyatlarında ciddi dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Petrol fiyatları 2019 ortasında 78 \$/varil değerlerindeki iken, yılsonunda 60 \$/varil değerlerine kadar düşmüştür. Yine, aynı dönem içerisinde oluşan üretim fazlalığı da dikkate alınmalıdır. Arz ve talep dengesizliklerinin ve üretim fazlalığının olduğu bu dönemde petrol fiyatları ciddi bir biçimde etkilenmiştir (OPEC Monthly oil market report, 2019).



Şekil 4. 2018 Kasım -2019 Kasım dönemi petrol fiyatlarındaki değişim
(OPEC Monthly oil market report, 2019)

Figure 4. Oil price variation between 2018 November and 2019 November

Salgının dünya geneline yayıldığı 2020'nin ilk çeyrek döneminde ise petrol fiyatlarındaki azalış çok daha fazla olmuştur. Şekil 5'te görüldüğü üzere 2020 Nisan ayı sonunda salgınla da ilişkili olarak dünyadaki stokların tamamına yakınının dolu olması sebebiyle petrol fiyatlarında rekor olarak nitelendirilen düşüşler olmuştur. 2019 son döneminde 60 \$/varil mertebelerinde bulunan petrol fiyatlarının Nisan 2020 döneminde 20 \$/varil mertebelerine kadar düştüğü görülmektedir (OPEC Monthly oil market report, 2020).



Şekil 5. 2019 Kasım -2020 Nisan dönemi petrol fiyatlarındaki değişim
(OPEC Monthly oil market report, 2020)

Figure 5. Oil price variation between 2019 November and 2020 April

Hem salgınla ilgili yaşanan değişimler, hem mevsimsel değişimler hem de petrol fiyatlarındaki son dönemdeki ciddi düşüşler bir araya geldiğinde; petrol ve doğal gaza olan talepte dünya genelinde ciddi bir azalış olduğu görülmektedir. Bu talep azalması direkt olarak petrol ve doğal gaz sondajlarının etkilenmesine sebep olmaktadır.

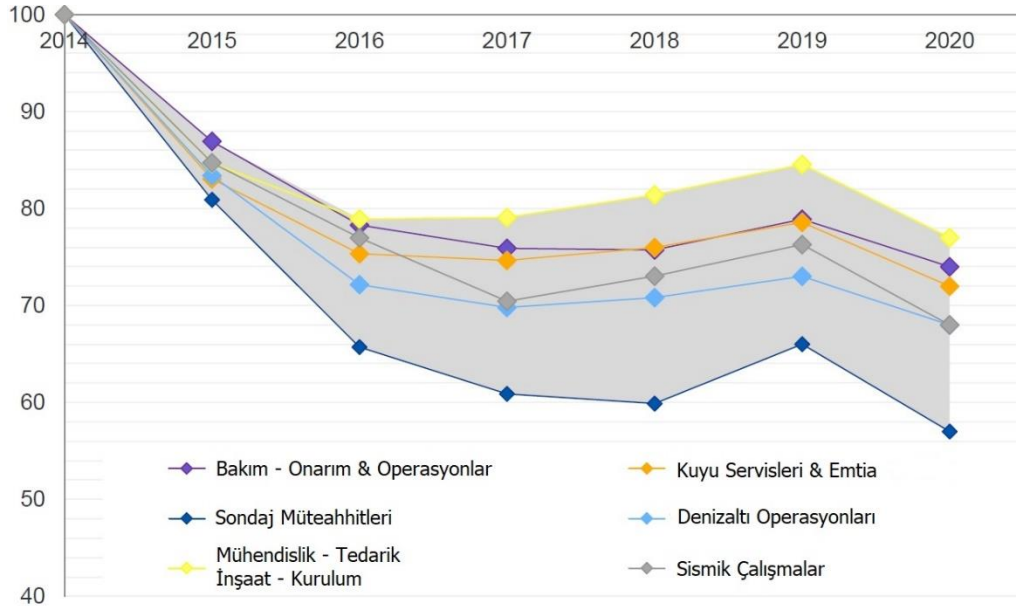
Sondaj basitçe; değerli olarak nitelendirilen hidrokarbonun bulunduğu yeraltındaki rezervlere ulaşmayı sağlayan bir kazı işlemi olarak adlandırılabilir (Bourgoyne ve diğ., 1991). Petrol ve doğal gaz ile ilgili operasyonlar da en yüksek bütçeye sahip olan operasyonel alandır. Sondaj operasyonunun maliyeti rezervin bulunduğu formasyon özellikleri ve derinliği ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca, sondaj operasyonunun gerçekleştirileceği bölgenin karasal bölgede olmaması da maliyetlerin katlanarak

artmasına neden olmaktadır. Özellikle deniz sondajlarında kullanılan platformların günlük işletim maliyetleri milyon dolar mertebelerindedir. Bu yüksek maliyetlerden dolayı sondaj operasyonları hedeflenen derinliğe ulaşılan kadar 7/24 şeklinde devam ettirilmekte; sahada veya denizde platformlarda görevli personeller belirli sürelerle vardiya değişimleri yaparak operasyonların devamlılığını sağlamaktadır. Bu süreler şirket politikalarına göre farklılık göstermekle beraber genelde 14, 21 veya 30 günde bir mühendis vb. seviyelerdeki personellerin değiştirilmesi esasına göre devam etmektedir. Karadaki sahalarda gerçekleştirilen operasyonlarda ise; mühendis vb. seviyedeki çalışanların mesaieleri benzer olmakla birlikte, işçi vb. personelin değişim süreleri farklılık göstermektedir.

Salgının sondaj operasyonlarını etkilediği iki ana nokta vardır. Bunlar personel değişimleri ve maliyetle ilgili sıkıntılardır. Salgının yoğunlaştığı ilk zamanlardan başlayarak ülkelerde sokağa çıkma kısıtlamalarının farklı uygulamaları olduğu görülmüştür. Bu kısıtlamalar kısmi, tam veya bazı iş kollarındaki çalışanların kontrollü dolaşımına izin verilmesi şeklindedir. Bizim ülkemizde de bazı iş kollarındaki çalışanların kontrollü dolaşımına izin verilmesi şeklinde bir sokağa çıkma kısıtlaması yapılmaktadır. Bu iş kollarından bir tanesi de petrol ve doğalgaz sondajı yapan enerji sektörüdür. Bu anlamda dolaşımda sıkıntı olmayacak gibi gözükse de seyahat kısıtlamalarından dolayı çok ciddi vardiya problemleri yaşanmaktadır. Özellikle farklı ülke ve uyruktan çalışanlara sahip petrol arama şirketlerinde bu sorun daha da ciddi olarak ortaya çıkmaktadır. Ülkeler arası uçak ile olan seyahatlerin tamamına yakınının sonlandırıldığı veya büyük oranda kısıtlandığı bu ortamda personel değişimlerinin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi mümkün olmamaktadır. Aynı şekilde şehirler arası uçak ile olan seyahatlerin de çok kısıtlı olduğu ve benzer durumun bu tip değişimlerde de gözlemlendiği görülmektedir. Sondaj operasyonlarının devamlılığı açısından bu durum önemli bir engel teşkil etmektedir.

Bununla birlikte, sondaj sahalarında bütün çalışanlar göz önünde bulundurulduğunda yaklaşık olarak 15-50 arası personel görevli olarak bulunmakta ve gün içinde mesai sırasında personel sirkülasyonu olmaktadır. Böylelikle çalışanlar için salgın göz önünde bulundurulduğunda, sağlık açısından uygun olamayabilecek bir ortamda çalışmalarına sebep olmaktadır. Ayrıca farklı bölge, şehir ve/veya ülkelerden bir araya gelen çalışan personelin Covid-19 virüsünü birbirlerine bulaştırma ihtimalleri de olabilmektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında, arama şirketlerinin gerek ülkemizde gerekse dünya genelinde aktif çalışan sondaj kulesi sayısında azalmalara gittiği görülmektedir.

Sondaj operasyonlarının etkilendiği ikinci durum maliyetlerle ilgilidir. Sondaj operasyonlarının maliyeti yüksektir. Büyük petrol şirketleri yatırımlarının önemli bir kısmını sondaj operasyonlarına yapmaktadırlar. Bu maliyetler ancak petrolün satış aşamasında karşılanabilmekte ve büyük şirketleri karlılığa geçirmektedir. Dolayısıyla petrol fiyatlarındaki düşüşlerden yapılan veya yapılacak olan yatırımlar doğrudan etkilenmektedir. Şekil 6'da 2014-2020 yılları arasında sondaj servis hizmetleri indeksi görülmektedir. Şekil 6'da görülebileceği üzere sondaj ile ilgili bütün yatırımlar azalım göstermektedir. Bir önceki gerileme döneminde sondaj servis fiyatları 2014-2017 yılları arasında ortalama % 20 oranında düşmüştür. 2020 erken dönemleri dikkate alındığında, sondaj servis fiyatlarının ortalama olarak yaklaşık % 8 oranında düşmesi öngörülmekteydi. Ancak pazarın geçen yıl sondaj servis fiyatlarında önemli bir artış yaşadığı göz önüne alındığında, sondaj müteahhitleri için etkinin daha şiddetli olması muhtemeldir (Covid-19 report of Rystad Energy, 2020). Bununla beraber salgının fiyatlar üzerindeki etkisi de düşünüldüğünde, sondaj servis hizmetleri fiyatlarında ciddi bir dalgalanma ve düşüş olacağı öngörülebilir.



Şekil 6. 2014-2020 yılları arasında sondaj servis hizmetleri indeksi (Covid-19 report of Rystad Energy)

Figure 6. Drilling services index between 2014-2020

Petrol üreten her ülkenin bir varil başına düşen USD dolar cinsinden kritik bir değeri aşağı yukarı vardır. Petrol fiyatlarının bu kritik değerin altında olduğu durumlarda ülkeler ve şirketler zarar etmekte, üstünde olduğu zamanlarda ise kar etmektedirler. Petrol fiyatları 2019 yılının son döneminde eski dönemlere göre bir düşüş göstermekteydi. Bunun sebeplerinin başında arz talepte olan dengesizlikler bulunmaktaydı. OPEC ülkeleri ve diğer petrol üreticisi ülkelerin petrol üretiminde azalma gitmemesinden dolayı bu durum 2020 başına kadar devam etmiştir. Bu süreçte de salgın Çin'den öncelikle Avrupa kıtasında, ardından tüm dünyada yavaş yavaş yayılmaya başlamıştır. Petrol fiyatlarındaki bu değişimden etkilenen ülkelerin ekonomilerinin de bu dönemde sıkıntıya girdiği görülmektedir. Nisan 2020'de ana petrol üreticilerinden olan Suudi Arabistan ve Rusya günlük petrol üretiminin azaltılmasında anlaşmaya varmışlardır. Ancak, tam da bu zaman diliminde salgın tüm dünyayı her anlamda etkisi altına almıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedilen kısıtlama uygulamaları devreye girmiş ve petrol talebinde ciddi bir azalma yaşanmıştır. Böylece, zaten düşük olan petrol fiyatlarında çok sert düşüşler görülmüştür. Bunun sebebi piyasada üretilenden çok daha fazla petrol olması, hemen her ülkenin stratejik rezervleri dâhil bütün depolarının dolu veya dolmaya yakın olması, denizlerdeki petrol tankerlerinin taşıdıkları petrolü boşaltacak bir alan bulamamalarıdır. Durum daha da kötü bir hal almış ve Nisan 2020 sonunda petrol fiyatları tarihinde ilk defa eksi değerleri görmüştür.

Petrol fiyatlarının bu denli düşük ve dalgalı olduğu bir dönemde sondaj faaliyetleri de etkilenmiştir. Arama şirketleri arama faaliyetlerini azaltmıştır. Bazı şirketler arama faaliyetlerini tamamen durdurmuş ve sondaj kulelerini çalıştırmamışlardır. Çizelge 2'de Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve uluslar arası olmak üzere aktif sondaj kulesi sayılarındaki değişim verilmektedir. Çizelge 2'de de görüleceği gibi, bir önceki yılın aktif sondaj kuleleri sayılarına göre değişimler her üç bölge içinde negatif değerlerdedir. Özellikle ABD'de sondaj sektöründe ciddi daralmalar olduğu görülmektedir. Uluslar arası ortalama değerlere bakıldığında da kule sayılarında % 147'lik bir azalma söz konusudur (Baker Hughes rig count overview and summary, 2020). Bu durum; özellikle 2020 yılı başında başlayan salgının petrol arz talebinde yarattığı değişimin sondaj sektörü üzerinde oluşturduğu etkiyi göstermektedir. Bunun sonucu olarak ta şirketler pek çok personelini işten çıkarmış veya süreli/süresiz izne çıkarmışlardır. Özellikle Kuzey Amerika'da arama ve petrol sektöründe çok büyük işten çıkarmalar yaşanmaktadır.

Çizelge 2. ABD, Kanada ve Uluslararası aktif sondaj kulesi sayısı değişimleri
(Baker Hughes rig count overview and summary, 2020).

Table 2. Active drilling rig counts for USA, Canada and international

Bölge	Sayım Tarihi	Aktif Sondaj Kulesi Sayısı	Değişim (%)
ABD	1 Mayıs 2020	408	-582
Kanada	1 Mayıs 2020	27	-34
Uluslararası	Nisan 2020	915	-147

2020'nin Mayıs ayı başında, yeni tip koronavirüs Covid-19 vaka sayılarında pek çok ülkede artışlarda ciddi düşüşler yaşanmıştır. Bu veriler göz önüne alınarak salgının bir derece kontrol altına alınabildiği belirtilmiş, Mayıs ayı ortası itibarıyla bazı ülkeler normalleşme süreçlerine başlayabileceklerinin sinyallerini vermiştir. Normal hayat sürecine dönüşün ekonomi üzerine de pozitif etkileri olacaktır. Bu süreç üretim tesisleri, fabrikaların açılması ve insanların gündelik normal hayatlarına kademeli olarak geçiş yapacakları uzun bir dönemin başlangıcıdır. Bu dönem itibarıyla üretimde yaşanacak artışlardan, şehirler arası ve ülkeler arası seyahatlerin normalleşmesinden ve insanların normal hayatlarına geçişlerinden ötürü petrol ve doğal gaz talebin artan bir oranda yükseleceği ön görülmektedir. Sonuç olarak ta petrol fiyatlarında yavaş olarak bir artışa sebep olabilecektir. Hayatın biraz daha normale dönmesi arama şirketleri için personel hareketlerini de kolaylaştıracaktır. Ön görüldüğü şekilde petrol fiyatlarında artış olması durumunda da, arama faaliyetlerine yatırım sağlanabilecek ve sondaj sektörünün faaliyetlerinde de artış olacaktır.

2020 son çeyreği ve 2021 dönemi için sondaj sektöründeki değişimler açısından farklı senaryolar bulunmaktadır. Bu senaryolar iyimser, kötümser ve iki senaryonun ortası olarak daha gerçekçi şekilde olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir. Her üç senaryo da, Covid-19 salgınının dünya genelindeki gidişatı ve bu gidişatın petrol fiyatları üzerine olan etkisi ile doğru olarak orantılıdır.

İyimser senaryo; salgının 2020 yaz sonuna kadar kontrol altına alınacağı ve bu süreçte de bir ilaç ve/veya aşı geliştirileceği ön görüşüne dayanmaktadır. Bu senaryoya göre normalleşme süreci özellikle 2020 yazının ilk dönemlerinden itibaren hızlı bir şekilde devam edecek ve sonbahar döneminde ise, salgının tamamen veya kısmen kontrol altına alınacağı ve ekonominin çarklarının Temmuz 2020 itibarı ile normal şekilde döneceği öngörülmektedir. Bu durum doğrudan petrol ve doğal gaz olan ihtiyacı arttıracaktır. İhtiyaç artışı, petrol fiyatlarındaki artışı tetikleyecek ve bunun sonucunda da sondaj faaliyetleri eskisi gibi kademeli olarak artarak devam edecektir. Bu senaryoya göre, salgının sondaj faaliyetlerine olan etkisinin sonbahar dönemi itibarıyla azalacağı düşünülebilir.

Kötümser senaryo; salgının 2021 yazı itibarıyla kontrol altına alınacağı ve bu süreçte de hem ilaç hem de aşı geliştirilmiş olacağı ön görüşüne dayanmaktadır. Bu senaryoya göre Mayıs 2020'de başlayacağı ön görülen normalleşme süreci çok yavaş adımlar ile rahatlamalara sebep olacaktır ve 2021 yaz dönemine kadar devam edecektir. 2021 sonbahar döneminde ise, salgın tamamen veya kısmen kontrol altına alınacaktır. Ekonominin çarklarının Temmuz 2021 itibarı ile salgın öncesi dönemde olduğu gibi döneceği, dolayısıyla petrol ve doğal gaz olan ihtiyacın da artacağı öngörülmektedir. Ancak yaşanmış olan bir yıllık neredeyse operasyonsuz geçebilecek bu dönemde pek çok arama şirketinin iflas edebileceği, büyük petrol şirketlerinin dahi ciddi ekonomik sıkıntılar yaşayabileceği düşünülmektedir. İhtiyaç artışı, petrol fiyatlarındaki artışı tetikleyecek ve bunun sonucunda da sondaj faaliyetleri çok az artışlar ile devam edecektir. Arama ve sondaj faaliyetlerinin salgın öncesi dönemdeki yoğunluğuna ulaşması ise, önümüzdeki birkaç senelik zamana yayılacaktır.

Daha gerçekçi olan üçüncü senaryo ise; salgının 2021 sonu itibarıyla kontrol altına alınacağı ve bu süreçte de önce aşı, ilerleyen dönemlerde de bir ilaç tedavisinin geliştirilmiş olacağı ön görüşüne dayanmaktadır. Kötümser senaryoya benzer olan bu senaryoya göre de; Mayıs 2020'de başlayacağı ön görülen normalleşme süreci çok yavaş adımlar ile rahatlamalara sebep olacak ve bu durum 2021 başına kadar devam edecektir. 2021 ilkbahar döneminde ise, salgın tamamen veya kısmen kontrol altına alınacağı ve ekonominin çarklarının Nisan 2021 itibarı ile salgın öncesi dönemde olduğu gibi döneceği

öngörülmektedir. Böylece petrol ve doğal gaza olan ihtiyaç ta artacaktır. Ancak yaşanmış olan yaklaşık 3-6 aylık operasyonsuz geçebilecek bu dönemde pek çok arama şirketi ve büyük şirketler ekonomik olarak etkileneceklerdir. İhtiyaç artışı, petrol fiyatlarındaki artışı tetikleyecek ve bunun sonucunda da sondaj faaliyetleri kademeli artışlar ile devam edecektir. Faaliyetlerin salgın öncesi dönemdeki yoğunluğuna ulaşması ise 2021 sonbahar dönemini bulabileceği öngörülmektedir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Petrol ve doğal gaz arama ve sondaj faaliyetleri doğrudan petrol fiyatları ile ilişkilidir. Petrol fiyatları ise, ekonomik olarak bir istikrar ve dünya genelinde normal hayat döngüsüne bağlıdır. 2019 sonunda Çin'in Wuhan şehrinde başlayan yeni tip koronavirüs Covid-19 salgınının dünya geneline yayılması ekonomik istikrarsızlığa ve dünya genelinde normal hayat döngüsünün kırılmasına sebep olmuştur. Salgınla ilgili farklı senaryolarda normalleşme süreçleri öngörülmektedir. Ancak gerçekleşecek olan senaryo hangisi olursa olsun, petrol ve doğal gaz sondaj faaliyetlerinin salgın öncesi döneme dönmesinin birkaç senelik bir zaman dilimine yayılacağı düşünülebilir. Daha uzun dönemde ise, petrol ve doğal gaz fiyatlarında artışların dalgalanmalı olarak artabileceği ve bunun sonucunda da petrol ve doğal gaz sondaj faaliyetlerine pozitif etkisinin olacağı öngörülebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baker Hughes rig count overview and summary. <https://rigcount.bakerhughes.com..> Ziyaret tarihi: 6 Mayıs 2020.
- Bourgoyne, A.T., Chevenert, M.E., Millheim, K.K. ve Young, F.S. 1991. Applied Drilling Engineering, Richardson, Texas, ABD.
- Covid-19 report of Rystad Energy. Global outbreak overview and its impact on the energy sector. 4th Edition. 1 April 2020.
- Koyama, K. ve Suehiro, S. 2020. Analysis of the impacts of Covid-19 on the global demand for oil, natural gas and LNG. IEEJ.
- OPEC Monthly oil market report. 11 December 2019.
- OPEC Monthly oil market report. 16 April 2020.
- Türkiye elektrik tüketimi raporu. Nisan 2020. Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ)
- World energy outlook report. 2019. International Energy Agency.



MADEN İŞLETMELERİNDE COVID 19 SALGININA KARŞI MÜCADELE VE ALINACAK TEDBİRLER

¹Bilgehan KEKEÇ , ²Niyazi BİLİM 

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE

¹bkekece@ktun.edu.tr, ²nbilim@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 18.11.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.01.2021)

ÖZ: Madencilik faaliyetleri ekonomiye can veren önemli sektörlerden bir tanesidir. Gerek ülke ekonomisine katkısı gerekse istihdam açısından güçlü bir sektördür. Herhangi bir sebeple üretime ara verilmesi ve ya durdurulması hem ekonomik açıdan hem de mühendislik açısından önemli etkilere sebebiyet vermektedir. Bu sebeple üretimin sürekliliğinin sağlanması gerekmektedir. İlk kez 2019 Aralık ayında Çin'in Wuhan kentinde ortaya çıkan Covid-19 virüsü hızla tüm dünyayı etkisi altına almış ve hayatın her alanını olumsuz olarak etkilemiştir. Dünya sağlık örgütü tarafından küresel pandemi olarak ilan edilen salgın, madencilik faaliyetlerini de etkilemiş, ekonomik açıdan ve üretim sürdürülebilirliği açısından işletmeleri yeni tedbirler almaya zorunlu kılmıştır. Bu çalışmada, madencilik faaliyetlerinin aksatılmaması, aynı zamanda da bulaş riskinin azaltılması veya önlenmesi açısından bir takım öneriler ve tedbirler sunulmaktadır.

Anathtar Kelimeler: Pandemi, madencilik, Covid 19

Struggle Against The Covid 19 Epidemic and Measures to be Taken in Mining Enterprises

ABSTRACT: Mining activities are one of the important sectors, giving life to the economy. It is a strong sector due to its contribution to both the national economy and employment. As a result of interrupting or stopping production for any reason, it develops negative effects both economically and in terms of engineering. For this reason, it is necessary to ensure the continuity of production. The Covid-19 virus, which first appeared in Wuhan, China, in December 2019, has rapidly affected the whole world and negatively affected all areas of life. The disease, which has been declared a global pandemic by the world health organization, has also affected mining activities and forced enterprises to take new measures economically and product sustainability. In this study, some suggestions and measures are presented in order not to disrupt mining activities and at the same time to reduce or prevent the risk of contamination.

Key words: Pandemic, mining, Covid 19

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Madencilik insanların ekonomik açıdan hayatını sürdürebilmeleri için başvurduğu sektörlerin başında gelmektedir. Birçok sektöre hammadde sunan madencilik faaliyetleri, istihdam açısından da önemli bir sektördür. Tarih boyunca madencilik, çeşitli mineraller veya türevleri olarak değişik çağlarda (Taş Devri (MÖ 4000'den önce), Bronz Çağı (4000 MÖ 5000 ila MÖ), Demir Çağı (MÖ 1500 ila MÖ 1780), Çelik Çağı (1780 ila 1945) ve Nükleer Çağ (1945'ten günümüze)) çeşitli toplumların sosyal ve ekonomik refahına büyük katkılar sağlamaya devam etmiştir (Hartman ve Mutmansky, 2002; Ernst & Young Turkey, 2011). Günümüzde, birçok sektör (inşaat, imalat, nakliye ve endüstriyel faaliyetler gibi) bütünüyle

hammadelere bağımlıdır ve hammadde eksikliğinden doğan fiyat artışlardan doğrudan etkilenirler (Jasiński ve diğ., 2018). Üretilen hammaddenin bir kısmı teknolojik devrime ayak uydurmada ve yeni teknolojik buluşların karmaşık işlevlerini gerçekleştirmede belirleyici bir rol oynamaktadır. Bütün bu bilgiler ışığında, günümüzde modern yaşam, madencilik faaliyetlerine büyük ölçüde bağımlıdır, çünkü sosyo-ekonomik gelişme, özellikle ekonomik büyümenin ana itici gücü olarak kabul edilen enerjinin ve doğal kaynakların varlığına ve üretimine bağlıdır (Ernst & Young Turkey, 2011; Jasiński ve diğ., 2018; Chen ve Wu, 2017). Özellikle savaş dönemlerinde, ülkeler mineral kaynaklarının güvenli ve istikrarlı bir şekilde tedarik edilmesini sağlamaya çalıştıkça mineral kaynakları daha da önem kazanmaktadır (Calvo ve diğ., 2018). Türkiye, dünyada üretilen 90 çeşit mineralden 60 çeşidini üretmekte ve pazara sunmaktadır. Dünya rezervleri açısından, Türkiye endüstriyel malzeme rezervinin % 2,5'ine sahiptir; doğal taş rezervinin % 40'ına, bentonit rezervinin% 20'sine, kömür rezervinin % 1'ine, metalik mineral rezervinin % 0.4'üne ve bor rezervinin% 72'sine sahiptir (Ernst & Young Turkey, 2011; Reichl ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2016; Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, 2017). Madencilik, rezerv çeşitliliği ve ekonomiye katkısı düşünüldüğünde vazgeçilemez bir sektördür. Ekonominin can bulduğu, hammadde ihtiyacının hemen hemen tamamının karşılandığı, stratejik önemlere sahip üretimin lokomotifini olan sektörün bir sebeple yavaşlaması veya durması istihdama, ekonomiye, üretim ve dış pazara tehlikeli ölçüde sekte vurmaktadır.

Çin'in Wuhan kentinde 2019 Aralık ayında ortaya çıkan ve Covid-19 adı verilen hastalığa yol açan koronavirüs, 200'ü aşkın ülkeye yayılım göstermiş, 47,4 milyondan fazla kişiye bulaşmış 1,21 milyondan fazla can kaybına sebebiyet vermiş ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından küresel bir pandemi olarak ilan edilmiştir. Türkiye'de de ilk vaka 11 Mart günü görülmüş, Kasım-2020 ayı itibarıyla hasta sayısı 382 bin, vefat edenlerin sayısı 10 bine yükselmiştir. Krizlerin öngörülmesi, hazırlanması, mümkün olduğu kadar önlenmesi ve acil durumların ele alınması günümüzün önemli konusudur. Vaka sayısının değişimi üzerine bir çok politika geliştirilmiş, bir çok önlemler alınmış, halkın süreç hakkında hızlı ve etkin bilgilendirilmesi sağlanmıştır.

Bu çalışmada, ekonomik veriler üzerinde büyük payı olan madencilik sektörünün üretim devamlılığının sağlanması açısından pandemi döneminde alınan/alınması gereken tedbirler ve öneriler anlatılmıştır. Ayrıca istihdamın yoğunluğu ve temas çevresinin genişliği göz önünde bulundurularak bulaş riskinin azaltılması ve nihayetinde önlenmesi için tedbir önerilerine yer verilmiştir.

ÜLKEMİZDE MADENCİLİK VERİLERİ (MINING DATA IN TURKEY)

Üretim, ülkelerin ekonomik gücünü ve kalkınmasını sağlayan önemli göstergelerdendir. Ülke ekonomisinin %1-3'ünü oluşturan madencilik sektörü, üretim ve ihracat rakamlarında pay sahibi olan büyük sektörlerdendir. Madencilik faaliyetlerinin rezerv ve üretim durumu, işyeri ve istihdam durumu ve ekonomik açıdan payı alt başlıklar halinde sunulmaktadır

Ülkemizde Rezerv Durumu ve Üretim (Production and Reserv in Turkey)

Türkiye, dünyada üretilen 90 çeşit mineralden 60 çeşidini üretmekte ve pazara sunmaktadır. Dünya rezervleri açısından, Türkiye endüstriyel malzeme rezervinin % 2,5'ine; doğal taş rezervinin% 40'ına, bentonit rezervinin% 20'sine, kömür rezervinin% 1'ine, metalik mineral rezervinin% 0.4'üne ve bor rezervinin% 72'sine sahiptir (Ernst & Young Turkey, 2011; Reichl ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2016; Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, 2017). Rezerv ve çeşitlilik açısından güçlü olan ülkemizde yıllara göre üretim miktarları Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Çizelge 1. Türkiye'de yıllara göre maden üretim durumu, (MAPEG, 2020)
(Table 1. Mine production situation according to years, (MAPEG, 2020))

Maden Cinsi (Ton)	2019	2018	2017	2016	2015
Enerji Hammaddeleri	97.371.718	100.831.833	87.866.620	817.717.017	61.929.516
Doğal Taş Üretimi	13.775.717	18.227.769	19.066.079	19.981.123	21.785.846
Çimento ve İnşaat Hammaddeleri	422.754.000	690.223.331	580.122.879	568.900.256	534.221.337
Metalik Madenler	34.125.509	39.532.457	32.186.076	28.213.959	26.203.016
Endüstriyel Hammadeler Üretimi	75.730.803	95.678.447	84.209.221	74.153.681	88.440.061

İşyeri ve İstihdam Açısından Madencilik (Mining in terms of workplace and employment)

Maden envanteri açısından zengin ülkeler arasında yer alan ülkemizde madencilik önemli bir sektördür. Gerek istihdam gerekse de iş kolu açısından kalkınmanın merkezinde yerini almıştır. Çizelge 2’de madencilik alanında faaliyet gösteren iş yeri sayısı ve işçi sayısı sunulmaktadır.

Çizelge 2. Türkiye’de madencilik alanında faaliyet gösteren iş yeri sayısı ve işçi sayısı, (MAPEG, 2020)
(Table 2. Number of workplaces and workers operating in the mining field in Turkey, (Mapeg, 2020))

Yıl	İşçi Sayısı			İşyeri Sayısı		
	Kamu	Özel	Toplam	Kamu	Özel	Toplam
2019	12352	110592	122944	50	6142	6192
2018	12045	112941	124986	56	6121	6177
2017	12600	117923	130523	53	6166	6219
2016	14435	109579	122062	70	6185	6255
2015	13672	109121	122793	71	6206	6277

Çizelge 2’de sunulan verilerden anlaşılacağı üzere güçlü istihdam payına sahip madencilik faaliyetlerinin yürütüldüğü birçok işyeri mevcuttur. Ülke ekonomisine de büyük katkı sağlayan madencilik faaliyetlerinin sürekliliğinin sağlanması ekonomik değerler açısından önem arz etmektedir.

Ekonomideki Pay Açısından Madencilik (Mining in terms of share in the economy)

Madencilik sektörü ülke ekonomisine büyük katkılar sunan bir sektördür (Çizelge 3). Hemen hemen tüm sektörlerin hammadde ihtiyacını karşılayan bu sektör, üretime dayalı sektörler arasında başı çekmektedir. Ülkemiz maden envanteri ve istihdam payı da göz önüne alındığında sektörün canlandırılması için gerekli tedbirlerin alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Global krizden etkilenen sektörlerden kaynaklı olarak hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkilenmektedir. Diğer bir deyişle, farklı sektörlerde yaşanan olumsuzluklar hammaddenin kaynağı olan bu sektörü de doğrudan etkilemektedir.

Çizelge 3. Madencilik sektörünün ülke ekonomisine katkısı, (MAPEG, 2020)
(Table3. The contribution of the mining industry to the national economy, (MAPEG, 2020))

Yıl	Türkiye Geneli		Madencilik Sektörü			
	Cari Fiyatlarla Toplam GSYH (milyon TL)	Cari Fiyatlarla Toplam GSYH (milyon \$)	GSYH İçindeki Madencilik ve Taşocakçılığı Sektörü (milyon TL)	GSYH İçindeki Madencilik ve Taşocakçılığı Sektörü (milyon \$)	TL Bazında Artış Oranı (%)	Sektör Payı (%)
2018	3.724.387	789.044	37.268	7.896	5,4	1,00
2017	3.110.650	852.618	27.863	7.637	12,1	0,90
1016	2.608.526	862.746	21.369	7.068	11	0,82
2015	2.338.647	861.879	19.255	7.096	-0,8	0,82
2014	2.044.486	934.855	19.410	8.875	-0,1	0,95

Pandemi Dönemi ve Genel Tedbirler (Pandemic Period and General Measures)

2020 yılında ilk kez Çin'in Wuhan kentinde ortaya çıkan ve tüm dünyada etkisi devam eden Covid 19 virüsü kaynaklı salgın, Dünya Sağlık Örgütü tarafından 11 Mart 2020 tarihinde pandemi olarak ilan edilmiş ve etkileri takip edilmeye başlanmıştır. Ülkemizde ilk vaka 11 Mart 2020 tarihinde görülmüş ve çeşitli tedbirler ve kısıtlamalar başlamıştır. İnsan sağlığını olumsuz olarak etkileyen bu ölümcül virüsten korunmak amaçlı, hem sağlık açısından hem de ekonomik tedbirler olmak üzere çeşitli hamleler yapılmış ve takip edilmektedir. Ülkemizdeki gelişmeleri takip ederek kamuoyunu bilgilendirme ve bilinçlendirme amaçlı çeşitli kurul ve komisyonlar oluşturulmuştur. Hemen her konuda dünyayı etkisi altına alan pandemi ekonomik veriler üzerinde de etkili olmuş ve önlem alma zorunluluğu getirmiştir. Alınan tedbirler ile pandemi kontrol altına alınmaya çalışılmış, tüm sektörler hareketlendirilmeye çalışılmış ve ekonomik verilerin olağan seyrine dönüşü amaçlanmıştır.

Tüm sektörlerin neredeyse durma noktasına gelmesine sebep olan pandemi, madencilik sektörünü de olumsuz etkilemiştir. Madencilik, üretim yöntemine bağlı olarak diğer sektörlerden farklılıklar arz etmektedir. Üretimin durdurulması ve tekrar üretime açılması aşamaları çeşitli riskler oluşturmakta ve özenli önlemler gerektirmektedir. Bu sebeple sektörün tamamen durdurulması çeşitli problemler doğurmaktadır. Tüm bunlar göz önüne alındığında üretimin ve faaliyetin durdurulması yerine tedbir alarak çalışmaların devam etmesi uygun görülmektedir. Ancak pandemi döneminde hastalığın bulaş hızı da göz önüne alındığında tedbirlerin bilinçli olarak alınması ve uygulanması zarurettir.

COVID-19 Riskine Karşı Madencilik Sektöründe Alınması Önerilen Tedbirler (Recommended Measures to be taken in the Mining Sector against COVID-19 Risk)

Madencilik faaliyetleri rezerv durumuna ve üretilen malzemenin stratejik önemine bağlı olarak, yerleşim yerlerine yakın veya uzak bölgelerde, cevherin oluşumuna ve ekonomik değerine göre yeraltı, yerüstü veya çözelti madenciliği olmak üzere çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Maden ocakları, üretim bölgelerinin dışında idari binalar ve bürolar, laboratuvarlar, yemekhaneler, yatakhaneler, ortak kullanım alanları (banyo, tuvalet vb.), bakım onarım tesisleri, makine parkları, stok alanları, açık pazar ve sergi alanları gibi çeşitli kompleksleri de bir arada bulundurmaktadır. Tesisin hemen her yerinde iş gücü kullanılmakta olup, işin yoğunluğuna göre faaliyet gösteren işçi sayısı organize edilmektedir. Sağlık Bakanlığı terkinlerine göre, bu dönemde bir arada toplu faaliyetler bulaşıcılık açısından son derece risk taşımaktadır. Bu sebeple, ilk etapta toplu faaliyetlerin ve bir arada bulunma süreleri üzerinde etkin çalışmalar yürütülmesi gerekliliği düşünülmelidir. Sayının indirgenmesi ve işin planlanması, güçlü organizasyon ile sağlanabilmektedir, bu da teknik personelin fiilen işin takip sürecinde bulunmasını gerektirmektedir.

Maden sahalarının ve bağlı tesislerinin faaliyetlerinin, riski en aza indirecek şekilde devamını sağlayabilmek için aşağıdaki tedbirler önerilmektedir.

Bilgilendirici Tabela ve İşaretlerin Kullanılması: Maden sahalarında toplu halde bulunma durumu olan ortak kullanım alanları ve çalışanların geçiş güzergâhlarında salgını anımsatıcı ve önerilen tedbirleri hatırlatıcı işaret ve ikaz tabelaların (Şekil 1) konulması bilinçlendirme işini güçlendirmektedir.



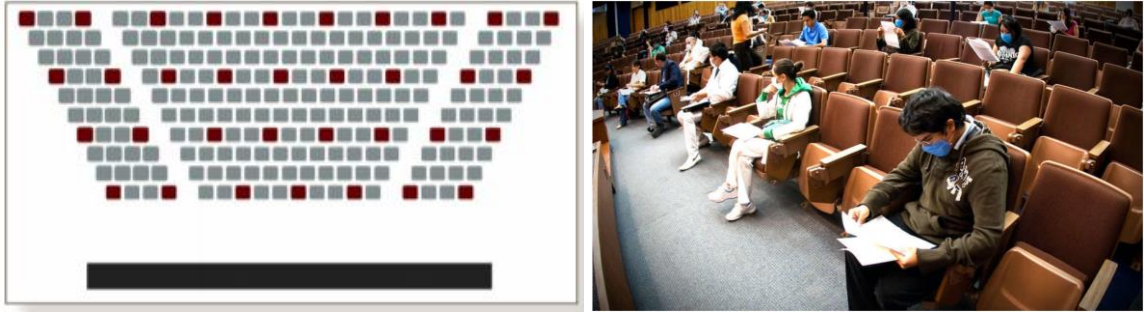
Şekil 1. Bilgilendirici ve uyarıcı işaretler
(Figure 1. Informative and warning signs)

Dezenfektan istasyonlarının kurulması (Creation of disinfectant stations): Yapılan iş ve işlemlerden sonra el dezenfeksiyonunu sağlamak üzere bina girişlerine toplu kullanım alanları girişlerine, el dezenfeksiyon istasyonlarının (Şekil 2) kurulması önerilmektedir.



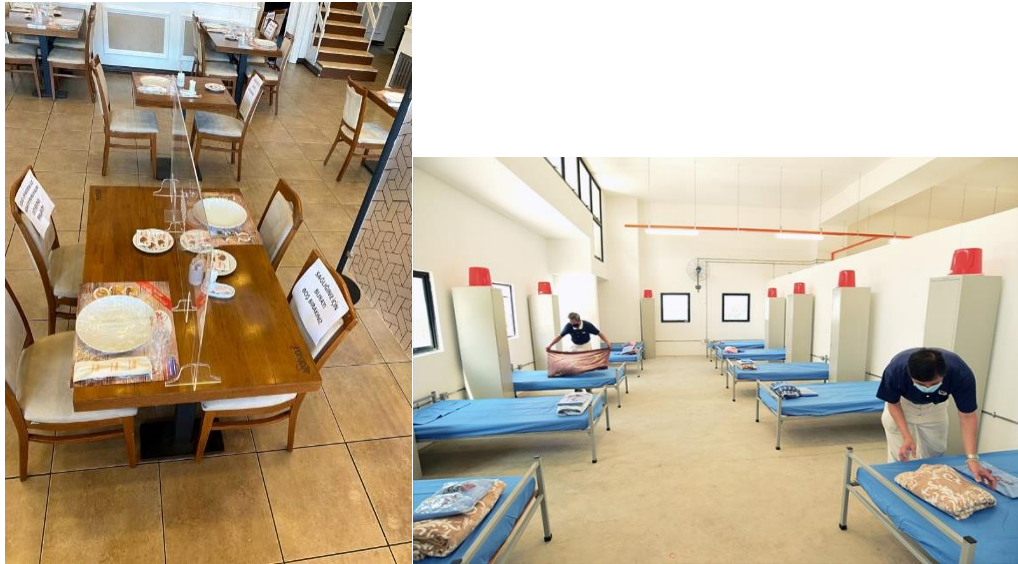
Şekil 2. El dezenfeksiyon istasyonları
(Figure 2. Hand disinfection stations)

Toplantı Sayılarının Azaltılması ve toplantı düzeninin organizasyonu (Reducing the Number of Meetings and organization of meeting order): Üretim sürekliliği ve verimli üretim gerektiren madencilik faaliyetleri için yapılan yoğun çalışmaların sunulması, raporlanması, planlanması ve kurum içi eğitimlerin sağlanması amacıyla yapılan çok katımlı toplantıların, pandemi döneminde rutinin dışına çıkarılması gerekmektedir. Zaruri toplantılar teknolojik yöntemler izlenerek yapılmalı ya da katılım sayısı sınırlandırılmalıdır. Ayrıca toplantılarda maske, mesafe ve hijyen kuralları uygulanarak, mesafeli oturma planlaması yapılmalıdır (Şekil 3).



Şekil 3. Toplantı oturma düzeninin planlanması
(Figure 3. Planning of meeting seating)

Yemekhane-Yatakhane düzeni (Order of dining hall and dormitory): Toplu olarak yemek yenilen ve şantiye yatakhanelerinde konaklayan işçiler arasında olası bulaş riskini azaltmak veya yok etmek için bir planlama yapılmalıdır. Yemek masalarında ve yatak aralarında mesafeli düzenine geçilmelidir (Şekil 4). Yemekhaneler maske kullanımının en az olduğu bölüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple sosyal mesafe kurallarına uyulmalı ve tuz, şeker, sürahi vb. ortak kullanıma sunulan materyaller kaldırılarak tek kullanımlık paketli ürünler tercih edilmelidir. Su kapalı olarak servis edilmeli, çatal, kaşık bıçak ve tabak tek kullanımlık olmalıdır.



Şekil 4. Yemekhane-yatakhane düzeninin planlanması
(Figure 4. Planning of dining hall and dormitory)

Yatakhanelerde havalandırma işlemleri uygun şekilde yapılmalı ve dezenfeksiyon işlemleri her gün tekrarlanmalıdır. Mümkün oldukça yatakhanelerden faydalanan kişi sayısı azaltılmalı ve sosyal mesafe kurallarına uygun dizaynlar yapılmalıdır.

Çalışan Sayısı Kısıtlaması ve Vardiya Düzeni (Restriction at Employees number and shift organization): Aynı ortamda çalışılan işlerin vardiyasında, işin aksamayacağı sayı ile kısıtlanarak bulaş riskinin en aza indirilmesi amaçlanmalıdır (Şekil 5). Mümkünse üretim kapasitesi belirli bir seviyede tutularak, birlikte çalışan işçi sayısı azaltılmalı, hijyen ve sosyal mesafe kuralları itinalı bir şekilde sağlanmalıdır. Vardiya değişimlerinde mümkünse bir müddet beklenerek asansör vb. aksamlar dezenfeksiyon işlemine tabi tutulmalıdır. Yeraltı işletmelerinde vardiya değişimlerinde, emici ve üfleme vantilatörleri birlikte çalıştırılarak hava sirkülasyonu sağlanmalıdır. Ayrıca, pandemi süreci boyunca gerek şantiyeye gerek üretim bölgelerine misafir ve ziyaretçi alınmamalı tüm giriş ve çıkışlar kayıt altına alınarak kontrollü giriş çıkışlar yapılmalıdır.



Şekil 5. Seyreltilmiş işçi yoğunluğu
(Figure 5. Reduced workers number)

Servis kullanımı ve oturma planı (Staff vehicle usage and seating plan) :Şantiyede konaklamayan ve gidiş dönüş yapan personelin işyerine taşınmasını sağlayan servislerde oturma planı mutlaka sosyal mesafe kuralları içinde sınırlandırılmalıdır (Şekil 6). Servis içerisinde maske ve hijyen kurallarına uyulmalıdır. Servis, personeli almadan mutlaka dezenfekte edilmeli, evden çalışması mümkün olan personel evden çalışmaya teşvik edilerek sayı sınırlaması planlanmalıdır.



Şekil 6. Mesafeli oturma düzeni
(Figure 6. Seating distance design)

Sağlık kontrolleri (Check-up): Sağlık kontrollerini pandemi için küçük zaman dilimlerinde periyodik hale getirerek teşhis olanağının artırılması amaçlanmaktadır (Şekil 7). Teşhis edilen kişinin karantina ve izolasyonu sağlanarak bulaş riskinin ekarte edilmesi sağlanmalıdır.



Şekil 7. Rutin sağlık taramaları
(Figure 7. Routine medical check-up)

Rutin dezenfeksiyon işlemleri (Routine disinfection procedures) : Toplu kullanım alanlarının ve sayı yoğunluğunun gün içerisinde fazla olduğu bölgelerin ve kullanılan araç-gereçlerin rutin olarak

dezenfeksiyon işlemlerinin yapılması, virüsün yayılma imkanını sınırlandıracak ve/veya yok edecektir (Şekil 8). Bu sebeple yatakhane, yemekhane, banyo, tuvalet, ofisler vb. alanlar temiz tutulmalı ve mümkün ise her gün dezenfekte edilmelidir.



Şekil 8. Servis ve büro dezenfeksiyonu
(**Figure 8.** Staff vehicle and office disinfection)

Tüm bu önerilen tedbir ve önlemlerin yanısıra kişisel bakım ve önlemler kural haline getirilmelidir. Özellikler kişisel hijyen, sosyal mesafe ve maske kullanımı son derece önemlidir. Bu konu ile ilgili her türlü eğitim yöntemleri seçilmeli ve tüm çalışanlar eğitici görsel materyaller, konu ile alakalı uzman kişiler ve diğer eğitici kanallardan faydalanılarak eğitilmelidir.

Karantina ve İzolasyon (*Quarantine and isolation*): COVID-19 için testi Pozitif biriyle temas halinde olan herkes 14 gün boyunca evde kendini izole edilmelidir. Kendi kendine izolasyon, son temastan 14 gün sonra sona erebilmektedir. Ancak COVID-19 için testi Pozitif çıkan çalışan, eğer ağır semptom gösteriyorsa tedavi süreci hastane de olmakta ve semptom göstermiyorsa evde tedavi süreci yapılmaktadır. Hasta şantiyede kalıyorsa bir izole yatakhane oluşturulmalı ve tedavi süreci aksatılmamalıdır. Mümkünse, sağlık kuruluşlarına yakın ve ulaşılabilir ortamlarda karantina, izolasyon ve tedavi süreci programlanmalıdır.

Maden İşletmelerinde Kontrol ve Denetim Mekanizmasının Kurulması (*Control at Mining Enterprises and Establishment of Control Mechanism*) : Mayıs 2020’de uluslararası çalışma örgütü (ILO) tarafından bir korunma ve kontrol listesi oluşturulmuştur (ILO, 2020). İşletmelerin özelliklerine göre sorgulanacak parametreler belirlenerek bir kontrol listesi oluşturulmuş, bu kontrol listesinin kullanım şartları belirlenmiş ve bu şartlara göre kontrol listesini kullanabilecek bir ekip oluşturulmuştur. Üretim faaliyetlerinin salgın dolayısıyla aksamaması için benzer tedbirler alınarak yayılım riskinin azaltılması planlanmalıdır. Kurulan kontrol ekibi tarafından rutin aralıklar ile çalışanlara, planlama, kaynak ve yönetim sistemi, eğitim ve iletişim, iş sağlığı gözetimi, hijyen ve temizlik, iş organizasyonu, seyahat ve hareketlilik, beslenme ve barınma vb. başlıklarda yöneltilen sorulara alınan yanıtlar ile belirlenen problemler çözülebilecektir. Böylece, bulaş riskinin azaltılması veya önlenmesi sağlanabilecektir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Dünya genelinde pandemi oluşturan COVID-19 salgını yaşamı ciddi anlamda etkilemekte ve tehdit etmektedir. İlk kez Aralık 2019’da Çin’in Hubei eyaleti Wuhan kentinden başlayan salgın kısa sürede tüm dünyayı etkisi altına almıştır. Hastalık hakkında bilinmeyenler henüz tam olarak anlaşılacakla birlikte, hastalığın bulaşma hızı ve ölümcül etkileri eğitimden ekonomiye, üretimden ihracata, sağlık politikalarından günlük yaşama, hayatın her alanında olumsuz etkiler yaratmaktadır. İlk vaka Ülkemizde Mart 2020 tarihinde belirlenmiş ve pandeminin seyri yakından takip edilmeye başlanmıştır. Artan vakalar ile birlikte birçok alanda tedbirler alınmış, idari anlamda genelgeler yayımlanarak, prosedüre tüm kamu ve özel sektör kuruluşlarının iştiraki sağlanmıştır. Kapsamlı tedbirler yayılım hızına etki etmektedir,

ancak bunun yanı sıra üretim ve ekonomik faaliyetlerin sürdürülebilirliği de göz ardı edilmemelidir. Üretim gücünün başında yer alan ve ekonomiye büyük katkılar sunan madencilik faaliyetlerinin de bu süreçte tedbirli devamlılığı sağlanmalıdır. Ekonomik girdisinin ve büyük iş istihdamının var olduğu maden sektörü için pandemi süreci, bir kat daha önem arz etmektedir. Bu yüzden tüm bahsedilen ve önerilen tedbirlerin uygulanması son derece önemlidir. Yoğun iş gücünün bulunduğu ve yemekhane, yatakhane, üretim alanı vb. gibi birçok toplu faaliyeti bünyesinde barındıran sektör için salgın yaklaşımı hakkında eğitimler, gerekli kişisel koruyucu donanımların temini, dezenfeksiyon istasyonları, uyarı ve bilgilendirme tabelaları salgınla mücadelede toplum kültürü oluşturmada önemli etkenlerdir. Pandemi süreci boyunca ziyaretçi sınırlaması ile birlikte toplu faaliyetlerden kaçınılarak, üretim aksamayacak şekilde sınırlı sayıda personel çalıştırılması süreci olumlu yönde etkileyecektir. Kişilerin mümkün olduğu kadar teması azaltılmalı ve sağlık taramaları yapılmalıdır. Erken teşhis ve semptom göstermeyen potansiyel taşıyıcıların belirlenmesi, olası bir yayılımı etkin bir şekilde engelleyecektir. Hasta ve/veya temaslı kişilere karantina ve izolasyon uygulanmalı tedavi süreçleri ile yakından alakadar olunması gerekmektedir.

Hastalığa karşı alınması gereken tedbir ve önerileri özetleyen bu tür makalelerin COVID 19'un ortaya çıkardığı sorunların giderilmesine destek olması amaçlanmaktadır. Ayrıca bu tür çalışmalar sonraki çalışmalara da kaynak teşkil edebilecek niteliktedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Chen, G.Q., Wu, X.F., 2017, Energy overview for globalized world economy: Source, supply chain and sink, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (69), 735–749.
- Calvo, G., Valero, A., Valero, A., 2018, How can strategic metals drive the economy Tungsten and tin production in Spain during periods of war, Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.exis.2018.07.008>.
- Ernst & Young Turkey., 2011, *Dunyada ve Turkiye’de Madencilik Sektörü*, Ernst & Young.
- Hartman, H.L., Mutmanský, J.M., 2002, Introduction to Mining. In *Introductory Mining Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1-24.
- ILO, 2020, COVID-19 and mining Prevention and control checklist, Switzerland
- Jasiński, D., Cinelli, M., Dias, L.C., Meredith, J., Kirwan, K., 2018, Assessing supply risks for non-fossil mineral resources via multi-criteria decision analysis, *Resources Policy* (58),
- MAPEG, 2020, http://www.mapeg.gov.tr/maden_istatistik.aspx, Erişim Tarihi: 06.11.2020
- Reichl, C., Schatz, M., Zsak, G., 2018, *World Mining Data 2018*, Wien: Federal Ministry of sustainability and tourism.
- Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, 2017, Natural resources. Retrieved from Ministry of Energy and Natural Resources web site: <http://www.enerji.gov.tr/en-US/Pages/Gold#>.
- Wang, R., Cheng, J., Zhu, Y., Xiong, W., 2016, Research on diversity of mineral resources carrying capacity in Chinese mining cities, *Resources Policy* (47), 108-114.



HAVA LİDARI VERİLERİNE UYGULANAN FARKLI ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİNİN SAM DOĞRULUĞUNA ETKİSİ

¹Duygu ARIKAN , ²Ferruh YILDIZ , ³Hasan Bilgehan MAKİNECİ 

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

¹darikan@ktun.edu.tr, ²fyildiz@ktun.edu.tr, ³hbmakineci@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 30.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.01.2021)

ÖZ: Sayısal Arazi Modelleri (SAM), konu olarak birçok uygulama alanı tarafından benimsenmiştir. Özellikle sivil amaçlı mühendislik çalışmaları, coğrafi bilgi sistemleri gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. SAM'ların üretimi yapılırken, daima güncel olması gerektiği için hızlı üretilebilir olmalı, kullanıcılar için yeterli doğrulukta olmalı ve üretimi ekonomik olmalıdır. SAM'ın doğruluğunu etkileyen önemli faktörlerden birisi, tercih edilen enterpolasyon yöntemidir. Bu çalışmada ağırlıklı ortalama ile enterpolasyon, polinom enterpolasyon, multikvadrik enterpolasyon, üçgenler ağında lineer enterpolasyonu, küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonu ve en yakın komşu enterpolasyon yöntemleri öncelikle teorik olarak açıklanmıştır ardından endüstriyel yazılımla araziye ait noktalar modelde test edilmiştir. Literatürde SAM çalışmalarında sık kullanılan bu altı farklı enterpolasyon yöntemlerine ait standart sapma sonuçlarının karşılaştırılması yapılan çalışmada en önemli amaçtır. Sonuçlar üzerinde uyumsuz ölçülerin ayıklanması için sigma testi uygulanmıştır. Sonra, çalışılan arazi üzerinde sabit bir alan içerisinde toplamda 1250 nokta olacak şekilde, iki farklı alan belirlenmiştir. Bu alanlar için dayanak ve örneklem sayıları farklı olarak ayarlanmıştır. Daha sonra her bir enterpolasyon yöntemi kullanılarak, arazi modeli tekrar incelenmiş ve aralarındaki sonuç değerlendirilmiştir. Araştırmalar sonucunda ağırlıklı ortalama yöntemin diğerlerine göre daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağırlıklı Ortalama Enterpolasyonu, En Küçük Eğrilikli Yüzey, En Yakın Komşu Enterpolasyonu, Lineer Enterpolasyon, Multikvadrik Enterpolasyon, Polinom Enterpolasyonu, Sayısal Arazi Modeli (SAM)

The Effect of Various Interpolation Methods Applied at Aerial Lidar Data on DTM Accuracy

ABSTRACT: Many application areas have approved Digital Terrain Models (DTM) as a subject. It is primarily used in many sectors, such as civil engineering studies, geographical information systems. When producing DTMs, they should be fast-produced, as they should always be up-to-date, sufficient accuracy for users and economical to manufacture. One of the essential factors affecting the accuracy of DTM is the selected interpolation method. In this study, weighted average interpolation, polynomial interpolation, multi quadratic interpolation, linear interpolation in the network of triangles, small curvature surface interpolation, and the nearest neighbor interpolation methods were explained theoretically and then the points of the area were tested in the model with the Surfer program. The comparison of standard deviation results of these six different interpolation methods, which are frequently used in DTM studies in the literature, is the most crucial purpose of the study. A sigma test was used to eliminate unsuitable measurements on the results. Then, two different areas were determined, with a total of 1250 points in a fixed area on the investigated area. The number of bases and samples for these areas are arranged differently. Then, using each interpolation method, the land model was reexamined, and the result

between them was evaluated. As a result of the researches, it is discovered that the weighted-average method gives better results than others.

Key Words: *Digital Terrain Model (DTM), Linear Interpolation, Multiquadratic Interpolation, Polynomial Interpolation, Small Curvature Surface Interpolation, The Nearest Neighbour Interpolation, Weighted Average Interpolation*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde konumsal bilginin üretilmesi güncel, yüksek doğrulukta ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu bilginin üretilip modellenmesi için ara değerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun içinde enterpolasyon yöntemleri geliştirilmiştir (Watson,1992). Günümüzde bilgisayar ve yazılım biliminin gelişmesi ile bu ihtiyaçların karşılanması kolaylaşmıştır. Üzerinde yaşadığımız dünya yüzeyi gibi düzgün olmayan yüzeylerin matematiksel olarak ifade edilmesinde zorluklar yaşanmaktadır. Bir arazinin veya arazinin bir kısmının doğru ifade edilebilmesi için yüzeydeki tüm noktaların koordinatı (x,y,z) bilinmesi gerekir. Fakat bu da pratikte mümkün olamamaktadır. Arazi üzerinde yeterli sıklıkta dağılmış koordinatı bilinen noktalara "Dayanak noktası" ya da "referans noktası" denir. Örnekleme noktaları yardımıyla modellenir. Dayanak noktalarının yüzeyde eşit sayı ve miktarda olmayan bir dağılım göstermesi yani rastgele bir durumu olması modellemede karşılaşılan bir durumdur. Yüzey modellemesi birden fazla şekilde yapılabilmektedir. Yüzey tek bir fonksiyonla ifade edilebilir ya da üçgenlere veya çoklu poligonlara parçalanarak (kare, dikdörtgen vs.) kısım kısım da yapılabilmektedir. Özellikle arazi yükseklikleri, sayısal arazi modellemesi yapılırken kullanılmaktadır.

ABD Jeolojik Araştırmalar Merkezi (USGS) tarafından SYM, yatayda x ve y eksenleri yönünde sabit oranlarda karelajlara ayrılmış ve düşeyde ortak bir datuma dayandırılmış yükseklik (z) değerlerini içeren arazinin sayısal kartografik benzerini gösteren bir yöntem olarak ifade edilmiştir (Yastıklı ve Jacobsen,2003). Kısacası x,y,z arazi yüzeyinin, bir benzerinin sayısal olarak gösterilmesidir. Bazı durumlarda SYM ve SAM (Sayısal Arazi Modeli) kavramları karıştırılmaktadır. SAM, SYM'den daha geniş kapsamlıdır. Yapay ve doğal (dere, kıyı, sırt vb.) önemli topoğrafik detayların, yükseklik değerlerini kapsayan ve yüzeyi en şekilde ifade eden SAM modelidir. Kısacası, SAM arazinin orman, bina bitki örtüsü vb. tüm yükseklikleri içerirken, SYM'ler sadece yeryüzünün topoğrafyasını yansıtır. SAM'ların üretimi SYM'lere göre daha uzun sürmektedir. Çünkü arazinin karakteristik detaylarına ait bilgilerin toplanması gibi bir problem söz konusudur. SYM'ler fiziksel yeryüzünü bütünüyle temsil edememektedir (Yanalak,2002). Bu sebeple yüzeyde bulunan tüm noktalar tanımlanamayacaktır. Bunun yerine örnekleme noktalarının yardımıyla ve uygun enterpolasyon fonksiyonunun seçilmesiyle modelleme yapılabilir.

SAM üretimi için hava fotoğrafları, uydu görüntüleri veya lidar verileri kaynak olarak kullanılmaktadır. Günümüzde lidar verilerinden yüksek kaliteli SAM üretimi yer bilimlerinde, mühendislik projeleri, jeomorfoloji, ormanlık alanlarının tespiti gibi sıkça kullanılan uygulamalar arasında yer almakta ve önemli bir rol üstlenmektedir (Liu ve Zhang,2011; Tarolli,2014; Montealegre ve diğ., 2015; Yang ve diğ., 2016; Bigdeli ve diğ., 2020). Lidar verileri, diğer uzaktan algılamadan üretilen verilere kıyasla yüksek konumsal çözünürlüğe (1 m'den daha az) sahiptir (Razak ve diğ., 2011). Lidar verilerindeki nokta bulutunun sık olması, SAM'ların üretiminde sıkıntılar meydana getirebilir (Shi ve diğ., 2009). Bu nedenle birçok çalışmada farklı enterpolasyon yöntemleri kullanılmış ve yöntemler arasındaki farklılıklar karşılaştırılmıştır. Örneğin, Chen ve diğ. (2018) radyal bazlı fonksiyon (RBF) ve kriging yöntemi kullanmış ve RBF yönteminin daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Enterpolasyon yöntemlerinin birbirleriyle farklı yanları olduğu gibi, ortak tarafları da vardır. Örnek olarak, multikuadrik yöntem ile polinom enterpolasyonunun amacı yüzeyi tek bir fonksiyonla elde etmektir. Ya da multikuadrik ve en küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonu uygulanırken öncelikle trend yüzeyi geçirilir. Bir başka yöntem olan ağırlıklı ortalama yönteminde ise çevresinde bulunan dayanak noktalarının ortalaması alınarak, noktanın yüksekliği hesaplanır. Bu yöntemle benzer şekilde, en küçük eğrilikli yüzey enterpolasyonunda da üçgen köşe noktalarına ait artık değerlerin ortalaması alınır.

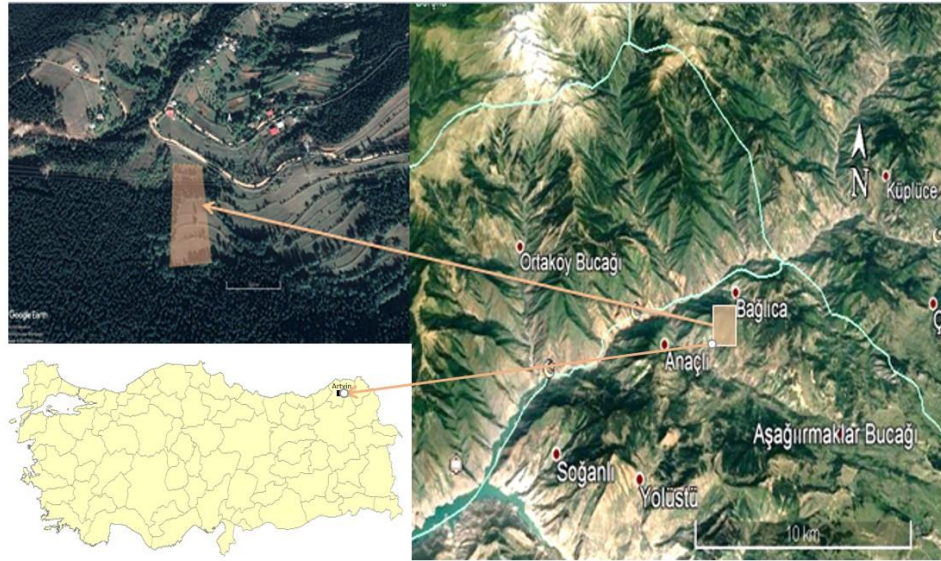
Ağırlıklı ortalama yöntemine benzeyen bir başka yöntem ise en yakın komşuluk yöntemidir. Bu yöntemde de çevresinde bulunan dayanak noktalarından yararlanır. Fakat ağırlıklı ortalaması alınmaz, çevresindeki en yakın noktanın yükseklik değerini kabul eder. Üçgenler ağında lineer enterpolasyonu diğer yöntemlere göre biraz farklı olarak sayılabilir. Bu yöntemde üçgenlerden her biri tam yatay düzlem değil de eğik olarak kabul edilir.

Bu çalışmada, hava lidari verileri kullanılarak sayısal arazi modellemesinde kullanılan enterpolasyon yöntemine ait sonuçlar incelenmiştir. Yaygın olarak kullanılan enterpolasyon yöntemleri olarak ağırlıklı ortalama, polinom, multiküadratik, üçgenler ağında lineer, en küçük eğrilikli yüzey, en yakın komşu enterpolasyonu seçilmiştir. Belirli bir bölgeye ait olan verilerin, Surfer programında tüm enterpolasyon yüzeyleri oluşturulmuştur. Ayrıca daha sonra yöntemlerin sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara sigma testi uygulanmış ve sonuçlar tekrar değerlendirilmiştir. Çalışmamızın amacı; simülatif veri yani teorik test yüzeyi yerine gerçek bir yüzey alanı kullanılmıştır. Böylece, gerçeği temsil etmesi ve güvenilir, ispat edilebilir olması hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma Bölgesi (Study Area)

Bu çalışmada hava lidari ile üretilen veri seti, Artvin ili Borçka ilçesi sınırlarında kalan bir vadinin 20 cm aralıklarla modellenebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Çalışmada üretilen toplam nokta sayısı milyardan fazla olduğu için işlemlerin kolaylaştırabilmesi için sadece bir kısmı kullanılmıştır.



Şekil 1. Çalışma Alanı; Artvin ili

Figure 1. Study area; Artvin Province

SAM Üretiminde Kullanılan Enterpolasyon Yöntemleri (Interpolation Methods Used In DTM)

Bu çalışmada enterpolasyon yöntemi olarak beş farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon,
- Polinom Enterpolasyonu,
- Multiküadratik Enterpolasyon,
- Üçgenler Ağında Lineer Enterpolasyon,
- En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu ve

- En Yakın Komşu Enterpolasyonu.

Ağırlıklı Ortalama ile Enterpolasyon (Interpolation with Weighted Average)

Ağırlıklı ortalama ile enterpolasyon yönteminde, enterpole edilecek noktanın z (yükseklik) değeri, etrafındaki dayanak noktalarına ait yüksekliklerden ağırlıklı ortalamaları alınarak hesaplanmaktadır. Dayanak noktalarından her birinin yüksekliği verilecek olan ağırlık değerinin enterpolasyon noktasına olan uzaklığının bir fonksiyonudur (Franke ve Nielson, 1980). Enterpolasyon noktasının yüksekliği (1) ile bulunur (Zhan-Ji,1998).

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m p_i z_i}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad (1)$$

Eşitlik açık şekilde yazılırsa (2) gibi sonsuza yakınsar.

$$z_0 = \frac{(p_1 \times z_1) + (p_2 \times z_2) + \dots + (p_3 \times z_3)}{(p_1 + p_2 + \dots + p_3)} \quad (2)$$

Bu eşitlikte:

Z_0 = Enterpolasyon noktasının yüksekliği,

z_i = Dayanak noktalarının yüksekliği,

p_i = Dayanak noktalarına etki edecek (atanacak) ağırlık değerleri,

m = Dayanak Noktasının sayısıdır.

Dayanak noktası ile enterpolasyon noktası arasındaki mesafe (s_i) olmak üzere, (x_0, y_0) yüksekliği hesaplanarak enterpolasyon noktasının koordinatı ve (x_i, y_i) dayanak noktalarından herhangi birinin koordinatları belirlenir. Bu durumda, ağırlık fonksiyonu (3) olur.

$$(s_i^2)^{-k} = [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{-k} \quad (3)$$

Ağırlık değerleri olarak; $p_i = (s_i^2)^{-k}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) kullanılabilceği gibi, (4) Gauss fonksiyonu da kullanılabilir (Güler,1978;1985).

$$p_i = e^{(-s_i^2/k^2)} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

Geniş arazi çalışmalarında yapılan enterpolasyonda, yüksekliği belirlenecek enterpolasyon noktasından uzakta bulunan noktaları çözüme dahil etmek sonucu olumsuz şekilde etkiler. Bu etkinin giderilmesi için iki çözüm önerisi sunulmaktadır. Birincisi, dayanak noktalarının hepsini kullanmak yerine sadece enterpole edilecek noktanın çevresinde bulunan dayanak noktalarını kullanmakla çözüm yapılabilir. Dayanak noktalarının seçiminde ise genellikle enterpolasyon noktası üzerinde daire ya da dikdörtgen çizilerek tespit edilir. Böylece enterpolasyonu yapılacak noktanın yüksekliği kritik daire ya da dikdörtgen içerisinde kalan dayanak noktalarının yükseklikleri yardımıyla belirlenir. İkincisi, Lee (Lee ve Preparata,1984), Watson (Watson ve Philip,1984) ve Sibson (1977)'in yapmış oldukları çalışmalarda enterpolasyon noktasının doğal komşularını kullandıklarını ifade etmişlerdir. Düzlemde olan ve çevrel çember içerisinde dayanak noktasından başka nokta olmayacak şekilde üçgenleme yapılırsa, bu Dealunay üçgenlemesi ismini alır (Yanalak,2002). Doğal komşuların birleştirilmesiyle oluşan bu üçgenler genelde eşkanar üçgen olmaktadır. Dar açılı üçgenlerin meydana gelmesi durumunda birbirine uzak olan ve aralarında doğrudan ilişki bulunmayan noktalar arasında doğrusal bir ilişki kurulamaz. Doğal komşular kullanıldığında, dikdörtgen veya kritik daire boyutunun belirlenmesi durumu da ortadan kalkmaktadır (Yanalak,2002).

Polinom Entropolasyonu (Polynomial Interpolation)

Yüzey modellemede çok kullanılan yöntemlerden biri de, polinom entropolasyonudur. Bu yöntemin temelinde, çalışılan alan sadece bir fonksiyonla ifade edilir. Fonksiyonun katsayıları, dayanak noktalarına ait koordinatlardan (x, y, z) faydalanılarak bulunur. Yüzey genellikle iki değişkenli ve daha yüksek dereceden polinomlarla gösterilebilir. Bilinen dayanak noktaları ile yararlanılan koordinatların oluşturduğu yüzey, n . dereceden ortogonal ya da ortogonal olmayan iki değişkenli polinomlar kullanılarak ifade edilebilir.

Ortogonal polinomlarla yüzey belirlenirken kullanılacak matematiksel model (5) ile ifade edilir.

$$z(x, y) = \sum_{k=0}^n \sum_{i=0}^{n-k} a_{ij} x^i y^j \quad (5)$$

Ortogonal polinomlarda; $n = 0$ seçildiğinde yüzey düzlem, $n = 1$ seçildiğinde yüzey lineer, $n = 2$ seçildiğinde oluşturulan yüzey kuadratik, $n = 3$ seçildiğinde oluşturulan yüzey kübik, $n = 4$ seçildiğinde oluşturulan yüzey kuartik, $n = 5$ seçildiğinde oluşturulan yüzey kuintik olarak adlandırılır. Ayrıca seçilen yüzeye göre de dayanak nokta sayısı belirlenmelidir. Örneğin, yüzey derecesi 1 seçildiğinde gereken dayanak nokta sayısı 3 ya da yüzey derecesi 2 seçildiğinde en az 6 dayanak noktasına ihtiyaç vardır (İnal,1996).

Ortogonal olmayan polinomlarla entropolasyonda kullanılan matematiksel model (6) ile gösterilir.

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n a_{ij} x^i y^j \quad (6)$$

Burada (6) a_{ij} : Polinomun bilinmeyen katsayılarını, n : Yüzey modelinin derecesi, i, j : Pozitif tam sayı olmak üzere (x, y) koordinatlarının üslü değerini ifade etmektedir (Erkanlı,1986).

Bu matematiksel ifadenin çözümü de ortogonal polinomların çözümü gibi yapılmaktadır. En az bilinmeyen sayısı kadar dayanak noktası gereklidir. Ortogonal olmayan polinomlarda seçilen dereceye göre yüzey farklı isimler alır. Örnek olarak, $n = 0$ seçildiğinde yüzey "düzlem" değerini alırken, $n = 1$ değeri seçildiğinde yüzey "bi-lineer", $n = 2$ seçildiğinde "bi-kuadratik" ve $n = 3$ seçildiğinde oluşturulan yüzey "bi-kübik" olarak isimlendirilir (Yılmaz,2019).

Buna göre (6) eşitliğinde yüzey derecesi 2 olarak seçilirse k 'nın katsayısı değerleri 0, 1 ve 2 olmaktadır. Bu durumda x, y koordinatlarının üslü ifadeleri (i, j) için, $k = 0 \Rightarrow (i = ,0 j = 0)$; $k = 1 \Rightarrow (i = ,0 j = 1)(i = ,1 j = 0)$; $k = 2 \Rightarrow (i = ,2 j = 0)(i = ,1 j = 1)(i = ,0 j = 2)$ değerlerini almaktadır ve yüzey derecesi 2 alındığında, bu polinomun matematiksel ifadesi (7) şeklinde olur.

$$z(x, y) = a_{00} + a_{01}y + a_{10}x + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \quad (7)$$

2. dereceden bir polinomun çözülebilmesi için 6 adet bilinmeyen hesaplanmalıdır. Yani toplamda 6 dayanak noktası (x, y, z) bilinen) ile 2. derece bir yüzey problemi tamamen çözülebilir. Oluşturulacak yüzey dayanak noktalarından geçer. Eğer bilinmeyenden fazla dayanak noktası kullanılırsa, bu durumda çözüm için gerekenden fazla sayıda eşitlik oluşur ve a_{ij} katsayıları En Küçük Kareler Yöntemine (EKKY) göre dengeleme sonucunda elde edilir. Böyle bir durumda oluşturulacak modelin yüzeyi dayanak noktalarından geçmez. m , dayanak nokta sayısı olmak üzere, 2. derece polinomun düzeltme eşitlikleri $L=1,2,\dots,m$ için (8) gibidir.

$$\Delta z_L = a_{00} + a_{01}y_L + a_{01}x_L + a_{20}x_L^2 + a_{00}x_L y_L + a_{02}y_L^2 - z_L \quad (8)$$

$$\sum_{L=1}^m \Delta z_L^2 = \min \quad (9)$$

Ayrıca (9) eşitliğinden yararlanılarak dengelenmiş yüzeye ait katsayılar bulunarak ve bu yüzey için n. dereceden bir polinom kullanılarak bilinmeyenlerin sayısı artar. Fakat uygulanan işlem adımlarında herhangi bir değişiklik olmaz. Sonuç olarak düzeltme eşitlikleri (10) şeklinde olur.

$$\Delta z_L = z(x_L, y_L) - z_L \quad (10)$$

$L=1,2,\dots,m$

Eşitlik (11)'e göre polinomun bilinmeyen katsayılarının, EKKY yöntemiyle dengelemesi yapılır.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 & y_1 & x_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ 1 & y_2 & x_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & y_m & x_m & x_m^2 & x_m y_m & y_m^2 \end{bmatrix} \quad \underline{X} = \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ a_{10} \\ a_{20} \\ a_{11} \\ a_{02} \end{bmatrix} \quad \underline{L} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \quad (11)$$

\underline{X} = Polinomun bilinmeyen katsayıları

\underline{A} = Bilinmeyenlere ait katsayılar matrisi

\underline{L} = Dayanak noktalarının yükseklikleri olmak üzere, bilinmeyenler (12) ile çözülür.

$$\underline{N} = \underline{A}^T \cdot \underline{A}, \quad \underline{n} = \underline{A}^T \cdot \underline{L}, \quad \underline{x} = (\underline{N})^{-1} \cdot \underline{n} \quad (12)$$

Yüksekliği hesaplanacak bir noktanın (x_0, y_0) koordinatları polinom çözümünde (10) eşitliğinde yerine konulduğu zaman z_0 yükseklik değeri bulunabilir.

Sonuç olarak, yüzeyin derecesi arttıkça olması gereken dayanak nokta sayısı da artmaktadır. Yeterli sayıda dayanak noktalarının olmaması durumunda bazı hatalar oluşur. Polinom derecesi arttıkça elde edilecek doğruluk orantılı bir şekilde artmaz aksine yüzeyde gereksiz salınımlar meydana getirir ve bu salınımlar gerçeğe uygun olmayan yükseklik değişimlerine sebep olur (Uluğtekin,1994). Bu da yanlış enterpolasyon yöntemi seçilmesi anlamına gelir.

Multikvadrik Enterpolasyon (Multiquadric Interpolation)

İlk olarak 1971 yılında Hardy tarafından çeşitli jeodezik problemlerin çözümü için önerilmiştir. Dağınık olarak ölçülmüş topoğrafik yüzeyleri temsilen kullanılmıştır. Multikvadrik yöntemde amaç dayanak noktalarının tamamını tek bir analitik eşitlikle, aynı anda ifade edilmesidir. Oluşturulan yüzey dayanak noktalarından geçmektedir (Uluğtekin,1994; Akçın,1998; İnal ve Yiğit,2003). Tekniğin uygulanabilmesi için öncelikle kontrol noktaları yardımıyla, m sayıdaki dayanak noktası kullanılarak bir trend yüzeyi geçirilmesi gerekir (Karaaslan ve diğ.,2016). Yapılan uygulamalarda trend yüzeyinin birinci ya da ikinci dereceden polinom kullanılmasının yeterli olduğu tespit edilmiştir (Leberl,1973; Yiğit,2003]. Bu yüzey için polinom, trigonometrik fonksiyonlar veya harmonik seriler kullanılabilir (Yanalak,2002). Trend yüzeyi n. dereceden bir polinom seçilmesi durumunda, polinom enterpolasyonunda olduğu gibi $z(x_j, y_j)$, polinomunun bilinmeyenleri ve dayanak noktalarındaki yükseklikler hesaplanır. Multikvadrik yüzeyin genel ifadesi (13) ve (14) şeklindedir.

$$\Delta z_j = z_j - z(x_j - y_j) \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^m C_j [Q(x_j, y_j, x, y)] = \Delta z \quad (14)$$

m sayıdaki Q yüzeyinin toplamıyla multikvadrik yüzey oluşmaktadır. C_j her bir Q yüzeyinin işaretini ve eğimini göstermekte ve Δz değeri ile hesaplanmaktadır. Literatürde farklı şekillerde multikvadrik yüzeyler önerilmiştir (Hardy,1971). Örneğin bu yüzeyler:

- (15) k sabit bir katsayı olmak koşuluyla, iki yapraklı dairesel hiperboloid serilerinin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + k]^{\frac{1}{2}} = \Delta z \quad (15)$$

- (16) Dairesel paraboloid serilerinin toplamı,

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + k] = \Delta z \quad (16)$$

- (17) Dairesel dik konilerin toplamı eşitliklerindeki gibidir.

$$\sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2]^{\frac{1}{2}} = \Delta z \quad (17)$$

Eşitliklerdeki k ifadesi sabit bir katsayıyı belirtmektedir. Dayanak noktalarının bilinen $(x_i, y_i, \Delta z_i)$ değerleri ile C_j katsayılarını bulunur. Yüzey olarak dairesel dik koninin seçilmesi durumunda ve dayanak noktaları için kısaltması ile (17) eşitliği (19) eşitliğine dönüşmektedir.

$$[(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2]^{\frac{1}{2}} = a_{ij} \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^m C_j a_{ij} = \Delta z_i \quad (19)$$

Sonuçta n sayıda lineer eşitlik sistemi elde edilir.

Bilinmeyen değerler C_j olup, katsayılar matrisinin gösterimi, $A, c = \Delta z$ şeklinde belirlenir. Eşitlikte \underline{A} ($m \times m$) katsayılar matrisi olmak üzere, \underline{c} ($m \times 1$) bilinmeyenler matrisini ve $\underline{\Delta z}$ ($m \times 1$) yükseklik matrisini ifade etmektedir. A matrisinin köşegen elemanlarının 0 olduğu göz önüne alınırsa (simetrik matris) işlemler daha anlaşılır olur. C_j katsayılarının bulunmasıyla multikvadrik yüzey belirlenir. (x_0, y_0) koordinatları bilinen herhangi bir enterpolasyon noktasının yüksekliği (20) ile hesaplanır.

$$z_0 = z(x_0, y_0) + \Delta z_0 = z(x_0, y_0) + \sum_{j=1}^m C_j [(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Dayanak noktalarının sayısı fazlaştıkça yöntemdeki hesap miktarıda fazlaşır. Bu hesap miktarının artma sebebi C_j katsayıları bulunurken matrisin invers işleminden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu yöntemde dayanak noktaları arasındaki mesafe arttıkça, bu noktaların elde edilecek yüzeye etkisi de azalır (Hardy,1971; Hardy,1972; Hardy,1975; Hardy,1990).

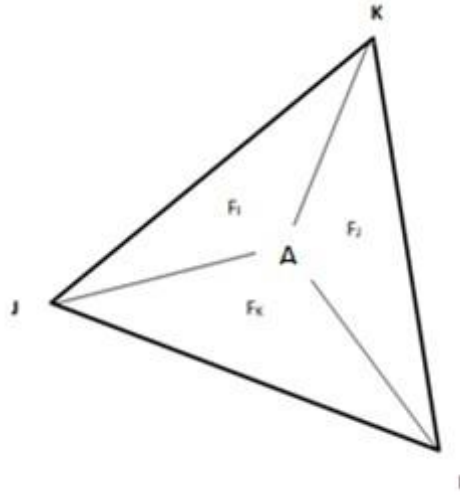
Üçgenler Ağında Linear Enterpolasyon (Linear Interpolation in Triangles Network)

Çokça kullanılıp tercih edilen enterpolasyon yöntemlerinden biri de, lineer enterpolasyon yöntemidir. Kullanılan üçgenlerden her biri eğik düzlem olarak tanımlanır (Watson ve Philip,1984). Bu yöntem de, enterpolasyonla yüksekliği belirlenecek noktalar, bulunduğu üçgen içerisinde uygulanmaktadır. Bir eğik düzlemin (21) şeklinde ifade edildiği varsayılırsa, oluşan her bir üçgenin 3 köşesine ait a_{00} , a_{10} , ve a_{01} katsayıları için üç farklı eşitlik yazılır.

$$z = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \quad (21)$$

Yüksekliği bulunacak noktanın x_0, y_0 koordinat değerleri (17) eşitliğinde ilgili yere yazılırsa z_0 yükseklik değeri bulunur. Üçgen ağında lineer enterpolasyonda, ağırlıklı ortalamadan farklı bir işlem

yapılmamaktadır. Bu yöntem de üçgenin köşe noktalarına ait yüksekliklerin ağırlıklı ortalaması alınmaktadır. Herhangi bir köşe noktasının yüksekliği, enterpolasyonu yapılan noktanın o köşeye göre local (yerel) barisentrik koordinatı olarak ifade edilir (Yanalak,2002). IJK üçgenine ait local barisentrik koordinatlar Şekil 2' de sunulmuştur.



Şekil 2. Lokal barisentrik koordinatları

Figure 2. Local barycentric coordinates

Şekil 2' de verilen üçgene ait köşe noktaları I, J ve K'dır. Bu durumda A noktası ait üç köşe için üç lokal barisentrik koordinat mevcuttur. Bu koordinatların toplamı 1 olmaktadır. A noktasından köşelere çizilen doğrular ile 3 adet küçük üçgen elde edilmiştir. Oluşan her bir küçük üçgenin IJK üçgenine oranlanmasıyla lokal barisentrik koordinatlar bulunmaktadır. Her bir küçük üçgenin alanları F_I , F_J , F_K ile toplam IJK üçgeninin alanı F ile ifade edilirse, A noktasına ait yerel barisentrik koordinatlar,

$P_I = \frac{F_I}{F}$, $P_J = \frac{F_J}{F}$, $P_K = \frac{F_K}{F}$ şeklinde çözülür. Yerel barisentrik koordinatlar, kartezyen dik koordinatları cinsinden ifade edilirse (22), (23), (24) ve (25) şeklinde yazılır.

$$P_I = \frac{(x_J - x_A)(y_K - y_A) - (x_K - x_A)(y_J - y_A)}{B} \quad (22)$$

$$P_J = \frac{(x_K - x_A)(y_I - y_A) - (x_I - x_A)(y_K - y_A)}{B} \quad (23)$$

$$P_K = \frac{(x_K - x_A)(y_I - y_A) - (x_I - x_A)(y_K - y_A)}{B} \quad (24)$$

$$B = (x_J - x_I)(y_K - y_I) - (x_K - x_I)(y_J - y_I) \quad (25)$$

Sonuç olarak enterpolasyon noktasının (z_0) değeri (26) şeklinde belirlenir.

$$z_0 = P_I z_I + P_J z_J + P_K z_K \quad (26)$$

En Küçük Eğrilikli Yüzey Enterpolasyonu (Surface Interpolation with Least Curvature)

Bu yöntemdeki amaç, grid köşelerindeki C_{ij} değerinin karelerinin toplamının minimum olmasını sağlamaktır (27) (Briggs,1974).

$$C = \sum_{i=1}^i \sum_{j=1}^j (C_{ij})^2 = [\text{minimum}] \quad (27)$$

Bir yüzeydeki eğriliklerin kareleri toplamı (28) ile ifade edilir.

$$C(z) = \iint \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (28)$$

C değerini en küçük yapan z fonksiyonun diferansiyel eşitliğini sağlaması gerekmektedir.

$$\frac{\partial^4 z}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 z}{\partial y^2 \partial x^2} + \frac{\partial^4 z}{\partial y^4} = 0 \quad (29)$$

Benzer şekilde (29) eşitliğini sağlayan z değeri eğriliklerin kareleri toplamını minimum yaptığı ispatlanmıştır (Briggs,1974). (29)' da verilen diferansiyel eşitliğinin çözümü "sınır koşulları" kullanılarak yapılabilmektedir. Kullanılacak sınır koşulları yüzeyin sınır normali (n) boyunca olması ve yüzeyin sınır köşelerinde $\frac{\partial^2 z}{\partial n^2} = 0$, $\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = 0$ olması koşuludur (Briggs,1974; Ayhan ve diğ.,1993; Smith ve Wessel,1990).

(23) eşitliğinin çözümü yapılan çalışmada açıklayıcı bir şekilde anlatılmıştır (Briggs,1974). Matris hesabıyla ya da iterasyonla olmak üzere çözüm iki şekilde de yapılabilir. Fakat iterasyonla çözüm yapılması önerilmektedir. Çünkü matris hesabında nümerik bağımlılık söz konusudur. İteratif çözüm aşamaları 4 aşamada özetlenirse:

- **1.Aşama:** Bu yöntemde yüzey tanımlamak için ilk olarak multiküadrik enterpolasyon da olduğu gibi bir trend yüzeyi geçirilir ve bu yüzey dışında kalanlar için Δz_i artık yükseklik değerleri hesap yoluyla bulunur.
- **2.Aşama:** Homojen veya rastgele olarak bulunan yüzeydeki dayanak noktalarının Δz_i artık yükseklik değerlerinden faydalanılarak grid köşelerindeki $\Delta z_{i,j}$ yaklaşık değerlerinin ortalaması alınarak bulunur.
- **3.Aşama:** Bir önceki adımda hesaplanan değerler ile iterasyon işlemine başlanır. Her bir iterasyonda, grid köşe noktalarındaki artık yükseklik değerleri hesaplanır. Bu hesabı yapabilmek için komşu grid noktalarındaki artık yükseklik değerlerinden yararlanılır ve yazılacak olan eşitlik normal bir grid köşesi için (30) eşitliğindeki gibi olur.

$$\Delta z_{i+2,j} + \Delta z_{i,j+2} + \Delta z_{i-2,j} + \Delta z_{i,j-2} + 2(\Delta z_{i+1,j+1} + \Delta z_{i-1,j+1} + \Delta z_{i+1,j-1} + \Delta z_{i-1,j-1}) - 8(\Delta z_{i+1,j} + \Delta z_{i-1,j} + \Delta z_{i,j+1} + \Delta z_{i,j-1}) + 20\Delta z_{i,j} = 0 \quad (30)$$

Grid köşe noktaları için yazılan eşitlik ile herhangi normal bir nokta için yazılan eşitlik birbirinden farklıdır (Briggs,1974; Smith ve Wessel,1990). Tüm noktalar için eşitliklerde bulunan $\Delta z_{i,j}$ değerleri hesaplanır ve bir sonraki iterasyon işlemi gerçekleştirilir. Birbirini takip eden iki iterasyondan üretilen $\Delta z_{i,j}$ değerleri arasındaki farkın ϵ olması istenmektedir. Bu ϵ değerinin altında bir sayıya ulaşılan dek iterasyon işlemi sürdürülür.

- **4.Aşama:** Son iterasyon işleminde bulunan artık yükseklik değerine, trend yüzeyindeki değeri de eklenir. Böylece grid köşe noktasının kesin yükseklik değeri elde edilmiş olunur.

En Yakın Komşu Enterpolasyonu (Nearest Neighbor Interpolation)

Bu yöntemde, ağırlıklı ortalama enterpolasyona benzer şekilde yüksekliği belirlenecek olan noktanın çevresindeki noktadan yararlanılmaktadır. Çevrede bulunan en yakın noktanın yükseklik değeri belirlenecek noktanın yükseklik değerine eşit kabul edilmektedir.

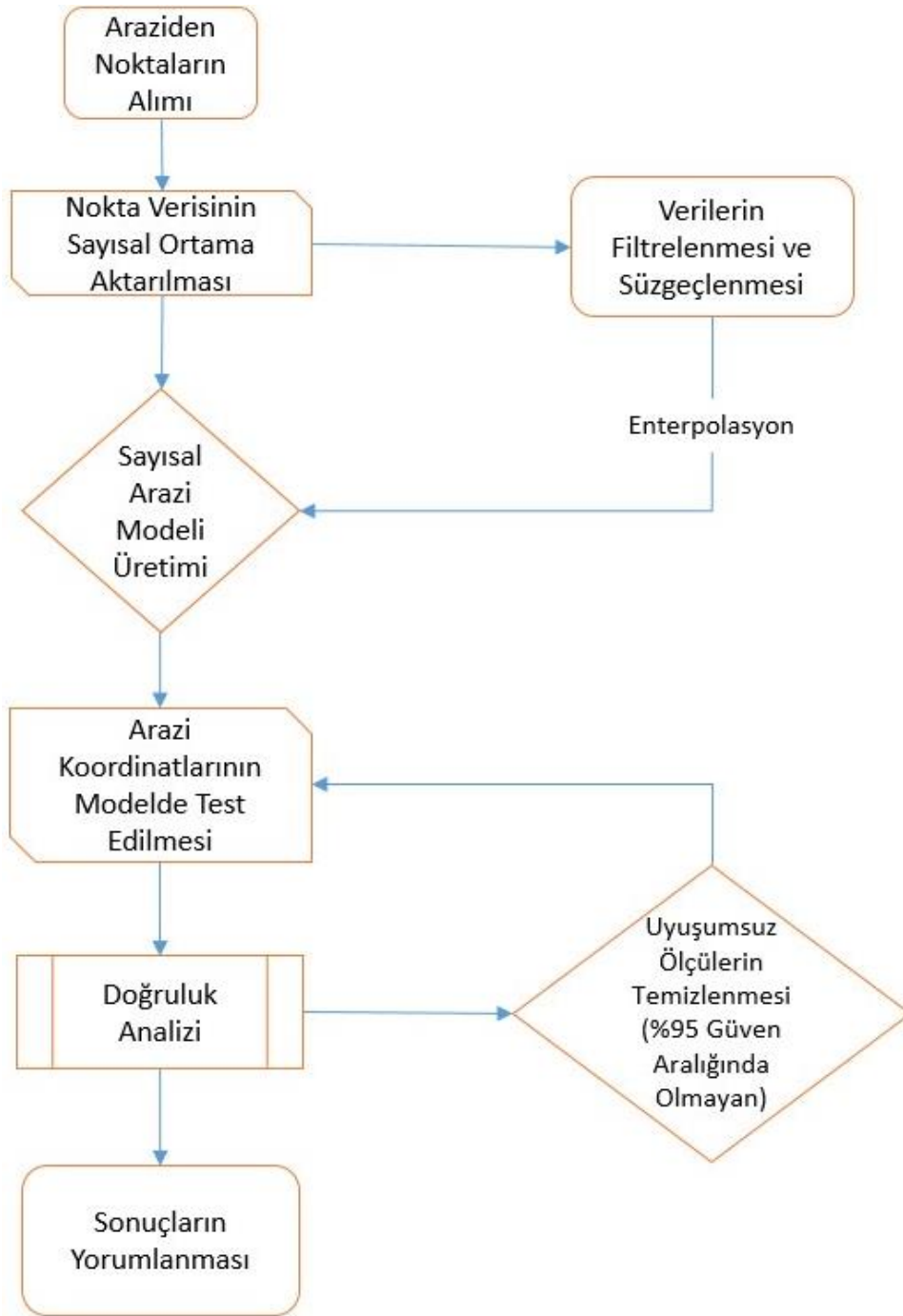
UYGULAMA (APPLICATION)

Çalışmada ağırlıklı ortalama, en yakın komşu, polinom, multikvadrik, en küçük eğrilikli yüzey ve üçgenler ağında lineer enterpolasyon yöntemleri karşılaştırılmıştır. Toplamda elde edilen nokta sayısı 2203 adettir. Bu noktalar sayısal ortama aktarılarak, gerekli süzgeçleme işleminden geçirilmiştir. Arazi yapısının düzenli eğimli olduğu bu kısımda en düşük yükseklik 1311.21 m ve en büyük yükseklik değeri de 1357.51 m olarak belirlenmiştir. Uygulamanın ilk aşaması olarak arazide homojen olarak dağılmış, 1662 dayanak noktası, geriye kalan 541 tanesi örneklem noktası seçilmiştir. Şekil 3. üzerinde beyaz nokta ifade edilen dayanak noktası ve kırmızı nokta ile ifade edilen örneklem noktalarının yerleri gösterilmiştir. Yapılan uygulamaya yönelik iş akış diyagramı Şekil 4’te verilmiştir. Farklı enterpolasyon yöntemlerine ait arazi yüzeyleri Surfer programında çizilmiştir. Bu yüzeylerin perspektif görünümü ve 3B görünümü Şekil 5-10 ’de verilmiştir.



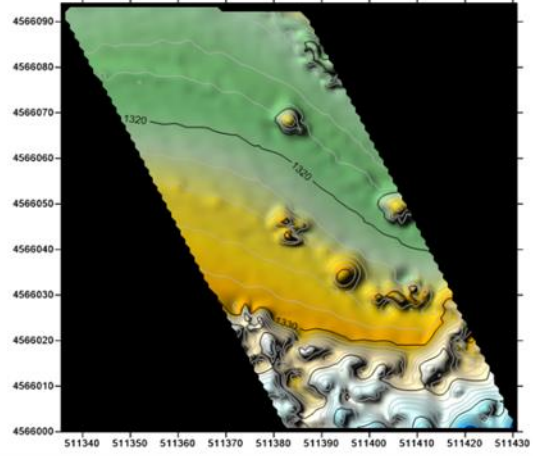
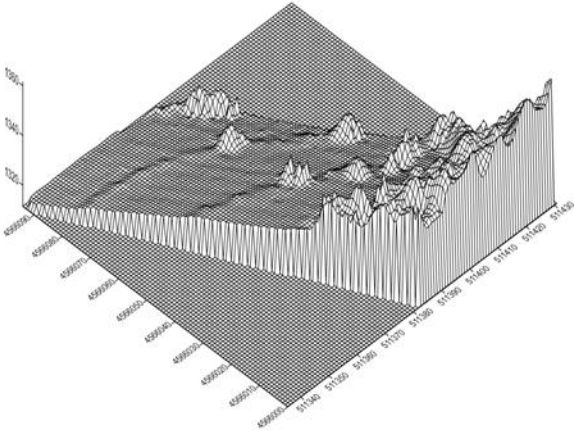
Şekil 3. Dayanak ve örneklem noktalarının konumları (Beyaz noktalar dayanak ve kırmızı noktalar örneklem noktaları göstermektedir)

Figure 3. Location of baseline and sampling points (White color points show baseline and red color points show sampling)

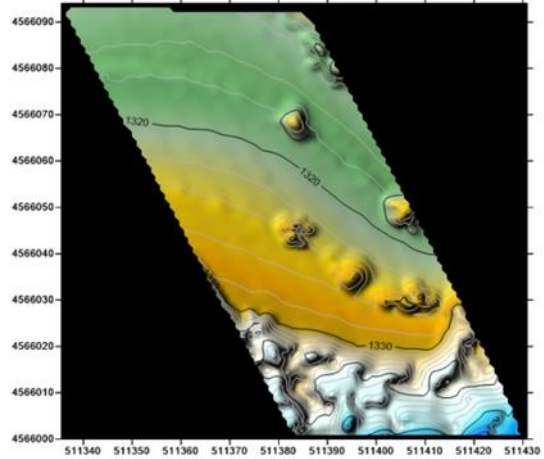
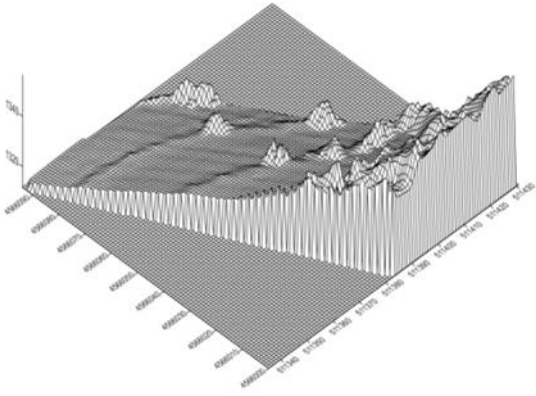


Şekil 4. İş-akış diyagramı

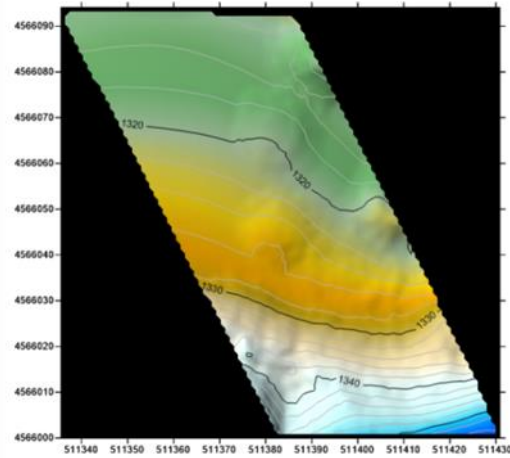
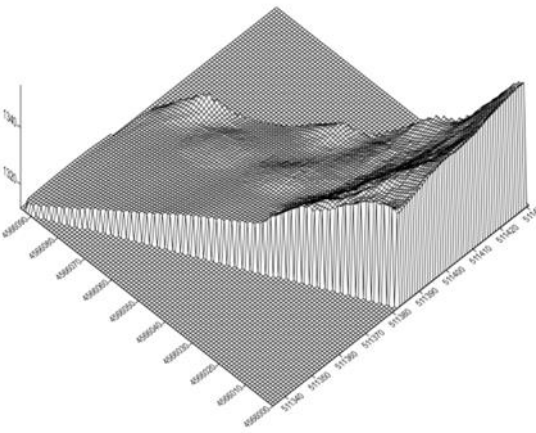
Figure 4. Work-flow diagram



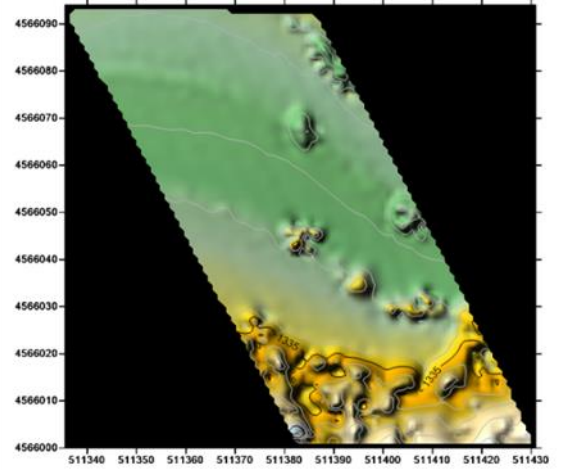
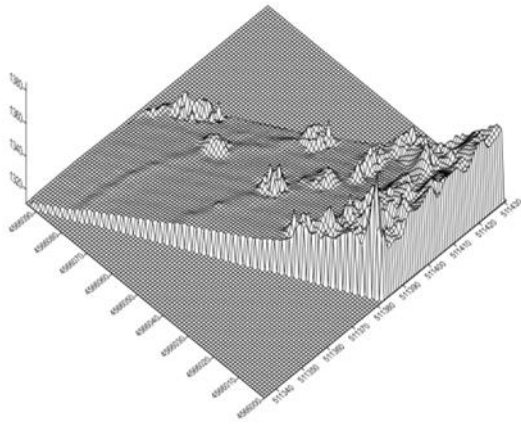
Şekil 5. En küçük eğrilikli yüzeyin perspektif görünümü ve 3B görünümü
 Figure 5. Perspective view and 3D view of the least curved surface



Şekil 6. Ağırlıklı ortalama yüzeyin perspektif görünümü ve 3B görünümü
 Figure 6. Perspective view and 3D view of weighted average surface

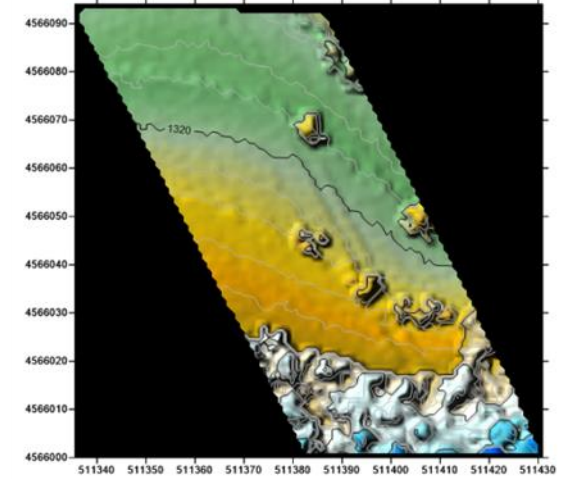
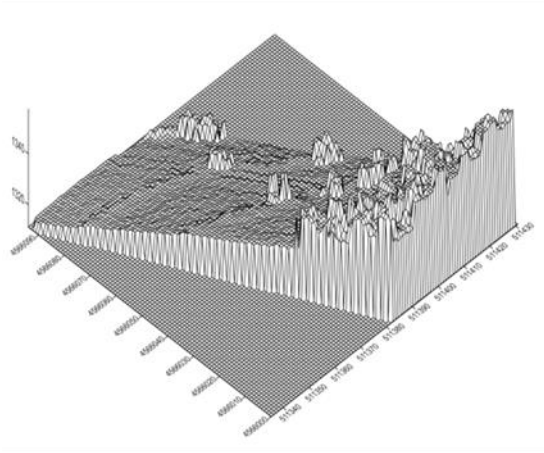


Şekil 7. Polinom yüzeyin perspektif görünümü ve 3B görünümü
 Figure 7. Perspective view and 3D view of polynomial surface



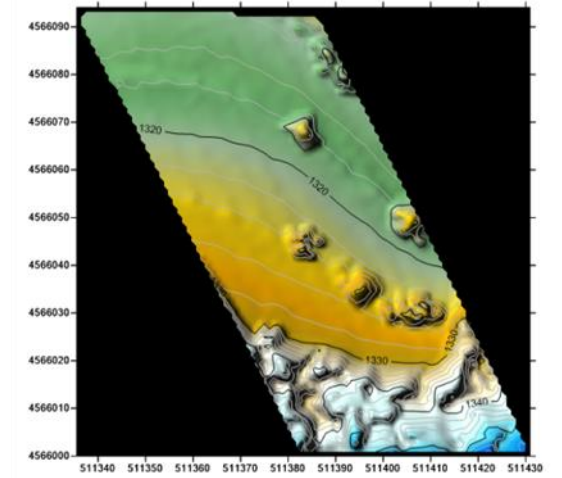
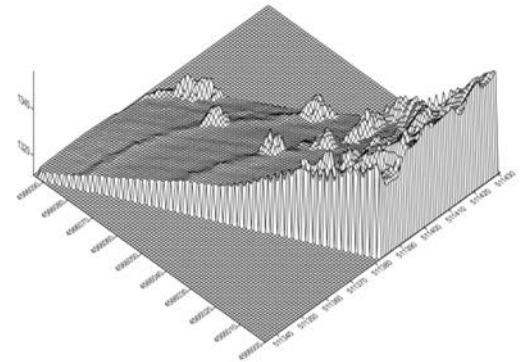
Şekil 8. Multikvadrik yüzeyin perspektif görünümü ve 3B görünümü

Figure 8. Perspective view and 3D view of multiquadric surface



Şekil 9. En yakın komşu yüzeyin perspektif görünümü ve 3B görünümü

Figure 9. Perspective view and 3D view of nearest neighboring surface



Şekil 10. Üçgenler ağında lineer enterpolasyon yüzeyinin perspektif görünümü ve 3B görünümü

Figure 10. Perspective view and 3D view of linear interpolation surface in a network of triangles

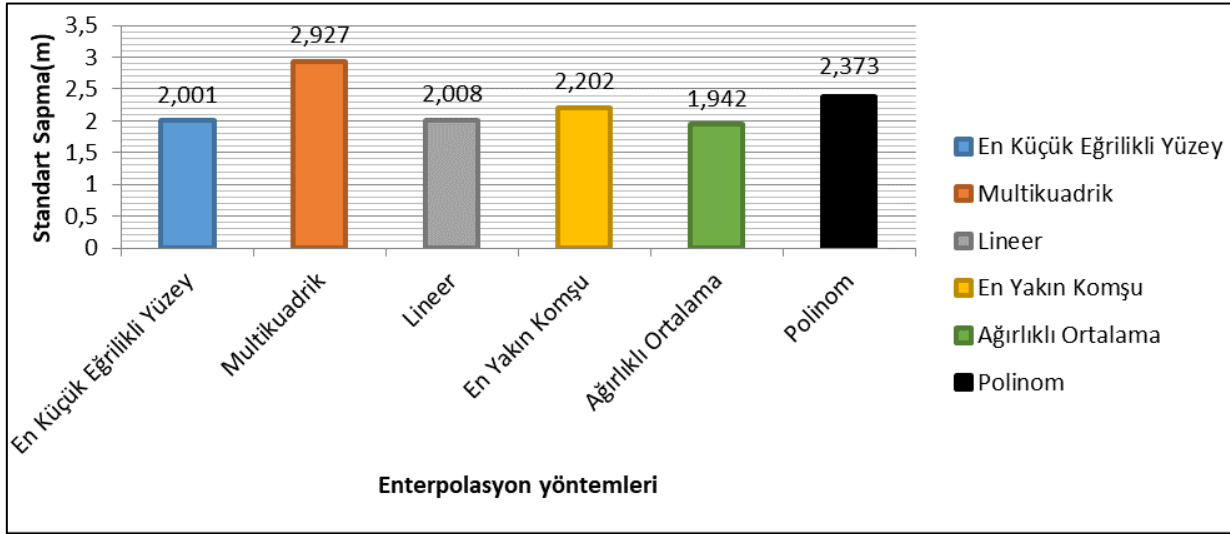
BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Enterpolasyon uygulanan noktaların gerçekteki yükseklik değerleri bilindiği için, her bir enterpolasyon yöntemine ilişkin doğruluk ölçütleri üretilmiştir. Bu ölçütler en büyük, en küçük, ortalama ve standart sapma hata değerleri Çizelge 1’de gösterilmiş ve yöntemler arasındaki farklılıkların karşılaştırılması için standart sapmaları Şekil 11’de grafik olarak verilmiştir.

Çizelge 1. Doğruluk ölçüt değerleri (metre biriminde)

Table 1. Accuracy measure value (m unit)

	En Küçük Eğrilikli Yüzey	Multikvadrik	Lineer	En yakın komşu	Ağırlıklı Ortalama	Polinom
Minumum	-11.49	-42.98	-14.54	-16.56	-13.64	-9.75
Maximum	7.55	10.64	8.30	7.62	7.77	7.87
Aralığı	19.05	53.63	22.83	24.18	21.41	17.63
Standart Sapma	2.00	2.93	2.01	2.20	1.94	2.37
Ortalama	-0.24	-0.30	-0.23	-0.23	-0.22	-0.39



Şekil 11. Enterpolasyon yöntemlerine ait standart sapma değerleri

Figure 11. Standard deviation values of interpolation methods

Elde edilen standart sapmalar değerlendirildiğinde ağırlık ortalama yönteminin standart sapmasının diğerlerine göre iyi olduğu, polinom enterpolasyon değerinin daha düşük olduğu anlaşılmıştır. İstatiksel olarak değerlendirmek, üst ve alt limitleri ayarlamak için ölçülerimize sigma testi uygulandı. Testte %95 oranındaki oranı sağlayabilmek için en büyük ve en küçük değerlerdeki gerekli sayıda veri kullanılmadı. Sonuç olarak elde edilen değerler, Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Sigma testi sonucunda üretilen doğruluk ölçüt değerleri (metre biriminde)*Table 2. Accuracy criterion values produced as a result of the Sigma test (in meters)*

	En Küçük Eğrilikli Yüzey	Multikuadrik	Lineer	En yakın komşu	Ağırlıklı Ortalama	Polinom
Minumum	-5.05	-4.78	-4.70	-5.20	-4.41	-4.82
Maximum	3.70	4.01	3.71	4.11	3.50	5.28
Aralığı	8.75	8.79	8.41	9.31	7.91	10.10
Standart Sapma	1.34	1.42	1.37	1.42	1.30	1.85
Ortalama	-0.20	-0.19	-0.19	-0.17	-0.18	-0.39

Çizelge 2 incelendiğinde Çizelge 1'e göre küçük değişiklikler olduğu görülmüştür. Standart sapmalara göre sıralama yapıldığında ağırlıklı ortalama, en küçük eğrilikli yüzey, üçgenler ağında lineer, multikuadrik, en yakın komşu, polinom enterpolasyonu şeklindedir. Test öncesi ve sonrası sıralamada ilk üçünün yeri değişmemiştir. Fakat test öncesi multikuadrik enterpolasyon 6. Sıradayken sigma testi sonrası 4. Sıraya gelmiştir. Bu yüzden sonuçların doğruluğunu tespit etmek amacıyla aynı test bölgesinde iki alan seçilerek güven aralığı testine tabi tutulmuştur. Bu alanlar içerisindeki toplam nokta sayısı 1250 olarak belirlenmiştir. Birinci bölge için dayanak nokta sayısı 1000 adet, örneklem nokta sayısı 250 adettir. İkinci bölge için dayanak nokta sayısı 750, test nokta sayısı 500 tanedir. İlk bölge için örneklem noktasının yaklaşık 4 katı kadar dayanak noktası, ikinci bölge için de dayanak nokta sayının üçte ikisi kadar nokta alınmıştır. Çok fazla dayanak noktasının sonuçlarda herhangi bir farklılık yaratıp yaratmayacağı incelenmiştir. Test sonuçların Çizelge 3 ve Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 3. Birinci bölge için sigma testi sonucunda üretilen doğruluk ölçüt değerleri (metre biriminde)*Table 3. Accuracy criteria produced as a result of the sigma test for the first zone (in meters)*

	En Küçük Eğrilikli Yüzey	Multikuadrik	Lineer	En yakın komşu	Ağırlıklı Ortalama	Polinom
Minumum	-1.89	-3.16	-2.16	-1.86	-2.01	-1.77
Maximum	2.47	4.36	3.63	3.76	3.50	4.97
Aralığı	4.36	7.53	5.89	5.62	5.51	6.74
Standart Sapma	0.46	0.82	0.64	0.55	0.51	0.96
Ortalama	0.02	0.07	0.06	0.06	0.03	-0.02

Çizelge 4. İkinci bölge için sigma testi sonucunda üretilen doğruluk ölçüt değerleri (metre biriminde)*Table 4. Accuracy benchmarks produced as a result of the sigma test for the second zone (in meters)*

	En Küçük Eğrilikli Yüzey	Multikuadrik	Lineer	En yakın komşu	Ağırlıklı Ortalama	Polinom
Minumum	-3.84	-3.99	-3.22	-3.99	-3.16	-1.99
Maximum	4.97	5.07	3.90	5.14	4.39	5.94
Aralığı	8.81	9.06	7.12	9.13	7.56	7.93
Standart Sapma	0.76	0.92	0.73	0.80	0.70	1.55
Ortalama	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	-0.02

Çalışmalar doğrultusunda, Çizelge 1’de verilen en büyük, en küçük, ortalama ve standart sapma değerleri incelendiğinde, kullanılan 6 adet test yüzeyi içerisinde en iyi yöntemin ağırlıklı ortalama olduğu anlaşılmaktadır. Ağırlıklı ortalama yönteminin diğerlerine göre daha iyi sonuç vermesi enterpole edilen yüksekliklerin, çevresindeki dayanak noktalarını kullandığı içindir. Standart sapmaların değişimi göz önüne alındığında enterpolasyon yöntemleri sırasıyla, ağırlıklı ortalama, en küçük eğrilikli yüzey, lineer, en yakın komşu, polinom ve multikuadrik olarak sıralanabilir. Multikuadrik enterpolasyon sonucunun düşük gelmesinin nedeni yüzeyi bütünüyle ele alan yöntemlerdendir. Bu nedenle çok sayıda iterasyon işlemi yapılmakta ve hesap yükleri fazla olmaktadır. Çizelge 2 sigma testi sonucu üretilen değerleri içermektedir. Sigma testi ile maksimum ve minumum değerlerinde sapmalar olabileceği düşünülerek belirli sayıda ölçüler, kullanılan tüm yöntemlerden atılmıştır. Böylece, Çizelge 2’deki standart sapma değerleri doğal olarak Çizelge 1’de bulunan değerlerden küçük olmaktadır. Ayrıca güven aralığı testi de uygulanıp, sonuçlar incelenmiştir. Birinci bölge için elde edilen sonuçların standart sapmalarındaki değişim sırasıyla, en küçük eğrilikli yüzey, ağırlıklı ortalama, en yakın komşu, lineer, multikuadrik, polinom şeklindedir. İkinci bölge içinse ağırlıklı ortalama, lineer, en küçük eğrilikli yüzey, en yakın komşu, multikuadrik ve polinom şeklindedir. İki bölgedeki sıralamada küçük yer değiştirmeleri olmuştur. Genel olarak bakıldığında, ilk üçte daima ağırlıklı ortalama, en küçük eğrilikli yüzey, lineer şeklinde, son üçte ise en yakın komşu, multikuadrik, polinom olmaktadır.

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, sayısal arazi modellenmesinde lidar veri seti kullanılarak realiteyi temsil etmesi ve güvenilir, ispat edilebilir bilgi olması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda, teorik test verisi kullanılmıştır ve bu çalışmaların sonuç ürünü olarak en küçük eğrilikli yüzey ve multikuadrik yöntem önerilmiştir. Yapılan bu çalışmada ise multikuadrik yöntem ve en küçük eğrilikli yüzeylerin iyi sonuçlar vermediği görülmüştür. Böyle bir farklılığın olmasının sebebi olarak, simülatif bir yüzey değil de gerçek yüzey kullanılması düşünülebilir.

Sonuç olarak, yükseklik modellemesinde dayanak noktalarının sayısı, noktaların homojen yapıda olup olmaması enterpolasyonu yapılacak noktanın doğruluğunu etkilemektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akçın, H., 1998, GPS ölçülerinden pratik yüksekliklerin elde edilmesi üzerine bir çalışma, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayhan, M.E., Alp, O., Üstün, M., “1993, Rastgele Dağılım Verilerden Bilgisayar Desteğinde Yüzey Modelleme”, T.U.J.J.B, Ankara, 103-118, 8-11 Haziran 1993

- Bigdeli, B., Gomroki, M., & Pahlavani, P., 2020, Generation of digital terrain model for forest areas using a new particle swarm optimization on LiDAR data, *Survey Review*, 52(371), 115-125.
- Briggs, I.C., 1974, Machine Contouring Using Minimum Curvature, *Geophysics*, 39, 1, 39-48.
- Chen, C., Li, Y., Zhao, N., Guo, B., & Mou, N., 2018, Least squares compactly supported radial basis function for digital terrain model interpolation from airborne Lidar point clouds. *Remote Sensing*, 10(4), 587.
- Erkanlı, Y., 1986, Koordinatlandırılmış modelde ve alanda enterpolasyon, kollakasyon yöntemlerinin uygulanması ve neticeleri, *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, Ankara, 56-57.
- Franke, R., Nielson, G., 1980, Smooth Interpolation of Large Sets of Scattered Data, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15, 1691-1704.
- Güler, A., 1978, Sayısal Arazi Modellerinde İnterpolasyon Yöntemleri, *Harita Dergisi*, 85, 53-70, 1978.
- Güler, A., 1985, Sayısal arazi modellerinde iki enterpolasyon yöntemi ile denemeler, *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, 52-53, 98-113.
- Hardy, R.L., 1990, Theory and Applications of the Multiquadric-Biharmonic Method: 20 Years of Discovery 1968-1988, *Computers Math. Applic.*, Vol. 19, No.8/9, pp.163-208.
- Hardy, R.L., 1971, Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, No.8, pp.1905-1915.
- Hardy, R.L., 1972, Analytical Topographic Surfaces by Spatial Intersection, *P.E.R.S.*, Vol. 38, No.5, pp. 452-458.
- Hardy, R.L., 1975, Research Results in The Application of Multiquadric Equations to Surveying and Mapping Problems, *Surveying and Mapping*, Vol. 35, pp.321-332.
- İnal, C. ve Yiğit, C. Ö., 2003, "Jeodezik Uygulamalarda Kriging Enterpolasyon Yönteminin Kullanılabilirliği", *TUJK 2003 Yılı Bilimsel Toplantısı, Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı*, Konya, s.177-185., 24-26 Eylül 2003.
- İnal, C., 1996, Yerel Jeoit Geçirilerek GPS Sonuçlarından Yüksekliklerin Belirlenmesi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Konya, 11, 15-21.
- Karaaslan, Ö., Kayıkçı, E. T., Aşık, Y., 2016, Jeoid Yüksekliklerini Belirlemek İçin Kullanılan Enterpolasyon Metotlarının Trabzon İli Verilerine Uygulanması, *Electronic Journal of Map Technologies*, 8(2), 151-164.
- Leberl, F., 1973, Interpolation in a Square Grid DTM, *ITC Journal*, 5, 756- 807.
- Lee, D.T., Preparata, F.P., 1984, Computational Geometry-A Survey, *IEEE Transactions on Computers*, c33,12, 1072-1101.
- Liu, X.; Zhang, Z., 2011, Effects of LiDAR data reduction and breaklines on the accuracy of digital elevation model. *Survey Review.*, 43, 614-628.
- Montealegre, A.; Lamelas, M.; Riva, 2015, J. Interpolation routines assessment in ALS-derived digital elevation models for forestry applications, *Remote Sensing*, 7, 8631-8654.
- Razak, K.A.; Straatsma, M.W.; van Westen, C.J., 2011, Malet, J.P.; de Jong, S.M. Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization, *Geomorphology*, 126, 186-200.
- Shi, W.; Zheng, S.; Tian, Y., 2009, Adaptive mapped least squares SVM-based smooth fitting method for DSM generation of LIDAR data. *Int. J. Remote Sensing*, 30, 5669-5683.
- Sibson, R., 1977, Locally Equiangular Triangulations, *Computer Journal*, 21, 243-245.
- Smith, W.H.F., Wessel, P., 1990, Gridding with Continuous Curvature Splines in Tension, *Geophysics*, 55, 3, 293-305.
- Tarolli, P., 2014, High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 216, 295-312.
- Uluğtekin, N., 1994, Sayısallaştırılmış kadastro paftalarının geometrik niteliğinin yükseltilmesi, *İTÜ Dergisi*, 52, 35-41.
- Watson, D.F., 1992, *Contouring: A Guide to The Analysis and Display of Spatial Data*, Pergamon press, Oxford, page:321.

- Watson, D.F., Philip, G.M., 1984, Systematic Triangulations, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 26, 217-223.
- Yanalak M.,2002, Sayısal Arazi Modellerinde Yükseklik Enterpolasyonu, Harita Dergisi, sayı:128, sayfa:44-58.
- Yang, B.; Huang, R.; Dong, Z.; Zang, Y.; Li, J.,2016, Two-step adaptive extraction method for ground points and breaklines from lidar point clouds, ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing, 119, 373–389.
- Yastıklı N., Jacobsen K.,2003, Automatic Digital Elevation Model Generation, Problems and Restrictions in Urban Areas, YTÜ dergisi, sayı:2003-2, sayfa:38-46.
- Yiğit, C. Ö.,2003, Elipsoidal yüksekliklerin Ortometrik yüksekliğe dönüşümünde kullanılan enterpolasyon yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Yılmaz N.,2019, Jeoid yüksekliklerinin belirlenmesinde ağırlıklı ortalama ve polinomlarla enterpolasyon yöntemlerinin karşılaştırılması, DÜMF Mühendislik Dergisi 10:2, sayfa: 743-754.
- Zhan-Ji, Y.,1998, Precise determination of local geoid and its geophysical interpretation, Doktora Tezi, Hong Kong Polytechnich University, Hong Kong



AÇIK KAYNAK MEDİKAL YARDIMCI ROBOT KOLUN PYTHON İLE İLERİ KİNEMATİK ANALİZİ

Mehmet GÜL

Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şırnak, TÜRKİYE
mgul@sirnak.edu.tr

(Geliş/Received: 01.10.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.02.2021)

ÖZ: Günümüzde Covid-19 gibi pandemik hastalıkların tüm dünyayı hızla etkilemesi ve buna bağlı tüm dünyada yüzbinlerce kişinin hayatına mal olmuşken sağlık çalışanlarının dünya genelindeki özverili çalışmalarının önemi ortaya çıkmıştır. Çalışmada, sağlık çalışanlarının iş yükünün paylaşılması için süreç içerisinde destek elemanları olarak medikal yardımcı makineler üzerine inceleme yapılmıştır. Geliştirilen medikal yardımcı robotik kol, sağlık çalışanlarının iş yükünün paylaşılması açısından özellikle pandemi sürecinde son derece önem arz etmektedir. Geliştirilen robot kol açık kaynak ve de eklemelerinin model baz alınarak uyarlanabilir olması son derece önemli bir özelliktir. Robot kolun açık kaynak olması oluşabilecek telif haklarından kaynaklı sorunlarında giderilmesi açısından son derece önemlidir. Robot kol profesyonel özellikte endüstriyel boyutlarda kullanıma uygun özelliklere sahiptir. Çalışmada kullanılan robot kol 3D yazıcıdan basılmış ve robot kol 5 serbestlik derecesine (5 DoF) sahip mafsalı robot koldur. 3D yazıcıdan basılabilir olması bu tür profesyonel robot kollar açısından maliyet olarak ciddi tasarruf sağlamaktadır. Robot kolun çalışma uzayının belirlenmesi ve ayrıca kontrolü açısından kinematik analiz önemlidir. Bu makalede, çalışma uzayının belirlenmesi, erişebilir noktalarının tespiti için ileri kinematik analizi derin öğrenme ile yapıldı.

Anahtar Kelimeler: Açık Kaynak Robot Kol, Python, İleri Kinematik Analiz

Forward Kinematic Analysis of Open Source Medical Assistant Robot Arm with Python

ABSTRACT: Today, pandemic diseases like Covid-19 affect the entire world rapidly, and due to this, the significance of the devoted work of healthcare professionals worldwide has emerged while it has cost the lives of a huge number of individuals around the world. In the study, so as to share workload of healthcare professionals, in the process, medical assistant machines were analyzed as support staff. The developed medical assistant robotic arm is extremely important especially within the pandemic process in terms of sharing burden of healthcare professionals. It is an extremely important feature that the developed robot arm is open source and its joints can be adjusted based on the model. The fact that the robot arm is open source is extremely important in terms of the issues that may emerge from copyrights. The robot arm has features appropriate for use in industrial dimensions with professional features. The robot arm utilized in the study is printed with a 3D printer and also the robot arm is articulated with 5 degrees of freedom (5 DoF). The fact that it can be printed from a 3D printer provides significant cost savings for such professional robot arms. Kinematic analysis is significant regarding determining and controlling the working space of the robot arm. In this study, forward kinematic analysis was done with deep learning for determination of working space and accessible points.

Key Words: Open-Source Robot Arm, Python, Forward Kinematic Analysis

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde insan sağlığının korunması ayrıca insan sağlığını tehdit eden pandemiler ile etkili mücadelelerin gerçekleştirilmesinde sağlık çalışanlarının önemli rolü bulunmaktadır. Bu sebeple sağlık çalışanlarının pandemi gibi durumlar için süreç içerisinde iş yüklerinin mümkün olduğunca azaltılması önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında, endüstriyel boyutlarda ve profesyonel kullanıma uygun açık kaynak robot kollar üzerine inceleme yapıldı. Çalışma kapsamında açık kaynak robot kolun seçilmesinin bazı kazanımları mevcuttur. Kazanımlar arasında robot kolun telif hakkının olmaması ve buna bağlı oluşabilecek zorlukların giderilmesidir. Bir diğeri, robot kolun eklemelerinin 3D yazıcı ile basılabilir olması maliyet açısından ciddi tasarruf sağlamaktadır. Özellikle öne çıkan kazanım, referans alınan açık kaynak robot kolun eklemelerinin istenildiği oranda revize edilebilir olması ve bunun sonucunda çalışma uzayının genişletilebilir olmasıdır. Çalışma kapsamında 3D yazıcıdan elde edilen robotik kolun kinematik analizi incelendi. Robotik sistemlerin kinematik modelinin analizi amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir, Cayley-Klein parametreleri, Gibbs vektörü, Euler açıları ve ortonormal matrisler gibi.

Robotik sistemlerin kinematik problemlerin çözümü için üç boyutlu Kartezyen uzayı ve dört boyutlu Kauterniyon uzayı olmak üzere iki farklı uzayda gerçekleştirilir. Matris veya vektörler gibi dönüşüm operatörleri Kartezyen uzayda tanımlanır ise nokta dönüşüm metodu olarak tanımlanır iken, Kauterniyon uzayında tanımlandığında ise doğrusal dönüşüm metodu olarak tanımlanır (Aspragathos 1988). Funda ve Paul doğrusal dönüşümü, doğrusal vektörler ve dönüşüm operatörleri (quaternion) kullanacak şekilde ifade ederken (Funda, 1988), Kim ve Kumar ise doğrusal vektörleri ve dönüşüm operatörleri robot kinematiğine uygulamayı başardı (Kim, 1990). Maxwell (Maxwell, 1900) Kartezyen uzayında nokta vektörlerinin dönüşümlerini kullanarak 4x4 homojen dönüşüm matrisini tanımlar iken, Denavit-Hartenberg homojen dönüşüm matrisini kullanarak bir koordinat sistemi oryantasyonunun başka bir koordinat sistemine göre tanımladı (Denavit, 1955). Koordinat sistemleri arasında dönüşüm matrisleri vida değiştirmesiyle (screw displacement) ya da doğrusal dönüşüm ile ifade edilir. Doğrusal dönüşüm metodu ile hem öteleme hem de dönme gerçekleştirilmektedir (Ball, 1900).

LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE SUMMARY)

Robotik sistemlerde kinematik iki bölüme ayrılır, ileri ve ters kinematik. İleri kinematik analiz, ters kinematik analizinin aksine denklemlerin karışıklığı zor değildir. Ters kinematik problemlerinin karmaşıklığının bir nedeni özellikle doğrusal olmayan denklemlerden kaynaklanmaktadır. Doğrusal olmayan denklemler ayrıca birleştirilemez ve benzersiz çözümleri de yoktur. Diğeri bir değişle fiziksel olarak çözümlenemeyen matematiksel denklemler ortaya çıkabilir. Liu ve diğ. 2015 6 serbestlik dereceli robot kolun ters kinematik analizi için geometrik yaklaşımı benimsemiştir (Nubiola, 2014). Qiao ve diğ., 2010 ters kinematik problemine çözüm bulmak için çift quaternion kullandı (Nubiola, 2014). Nubiola ve Boney, ise robotik sistemler için daha basit ve etkili bir çözüm yolu kullandılar (Almusawi, 2016). Özellikle yakın zamanda yapılan çalışmalarda yapay zekâ (AI) yöntemleri robotik sistemlerin ters kinematik çözümlerinde kullanıldığı görülmektedir (Köker, 2013; Duka, 2014; Uchiyama, 1987).

Öte yandan, Uchiyama ve ark. konum / kuvvet kontrol politikasını (policy) ikili robot sisteminin kontrolü dahil ettiler (introduce). Yaptıkları analiz sonucunda iki 4-DOF B-Hand robotlarının eş güdüm halinde çalışabilmesi açısından ihtiyaç duydukları konum/kuvvet değerlerini hesapladılar. Kopf ve Yabuta yaptıkları çalışmada yukarıda belirtilen master / slave pozisyon prensibine dayalı sistem ile konum / kuvvet eşgüdüm politikasını karşılaştırdılar. Tarn ve ark. ise yaptıkları çalışma kapsamında çift kollu robot sistemlerinde iş birliği için gerekli olan dinamik kontrol yöntemlerini önerdi. Yaptıkları çalışmada Tarn ayrıca bir nesnenin çalıştırılırken çift kollu robotun dinamik denklemi de inceledi.

Çalışma alanı, insansı robot kolun hareket esneklik derecesi sonucu oluşacak uç efektrörünün uzayda oluşturacağı nokta koordinatını ifade eder. Robotik kolun çalışma uzayındaki konumunun belirlenmesi için geliştirilen çözüm yöntemleri temel olarak grafik yöntem, analitik ve sayısal olarak sıralanır. Grafik yöntem ve analitik yöntem, eklem sayısı ile sınırlı olmak ile beraber robotik kollar için doğru bir tanımlanmamak ile beraber bazı sınır yüzeyleri için güvenilirliği garanti edilemez (Corke, 1996 ve Kelmar,

1990). Çalışma kapsamında 5 serbestlik derecesine sahip robotik kolun ileri kinematik modeli D-H yöntemi ile analizi yapıldı. Çalışma alanı analizinde Python programlama dili kullanıldı.

İLERİ KİNEMATİK ANALİZİ VE HOMOJEN TRANSFORM (FORWARD KINEMATIC ANALYSIS AND THE HOMOGEN TRANSFORM)

Robot manipülatörünün her bir eklemının alacağı pozisyon ve yön, uç efektörünün çalışma uzayındaki konumunu doğrudan etkiler. Revolut veya prizmatik eklemler arasındaki bağlantılar ile prizmatik veya kayan eklemler arasındaki bağlantılarına eklem değişkenleri denir. Revolut linkler ya da prizmatik linkler arasındaki açı değerleri eklem değişkenleridir (Wu ve diğ., 2014).

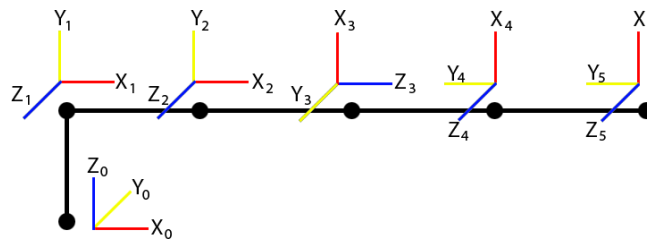


Şekil 1. 5 serbestlik dereceli (DoF) robot kol

Figure 1. Robot arm with 5 degree of freedom (DoF)

Robotik sistemin belirli durumlarda nasıl hareket ettiğinin analizi için o sistemin kuvvet, atalet ve enerji gibi dinamik büyüklüklerinin bilinmesi gerekmektedir. Robotik sistemlerde ileri kinematik robot bağlarının konumları, hızları ve ivmeleri arasındaki ilişkiyle tanımlanır. Robotik sistemler birbirine bağımlı dönel ve prizmatik eklemler ile tutturulmuştur. Her eklemın koordinat sistemi üzerinde bir sonraki eklem ile olan ilişkisi dönüşüm matrisleri olarak tanımlanır. İleri kinematik belirlenen eklem değişkenlerine göre uç efektörünün Kartezyen uzaydaki konumunun belirlenmesi işlemine denir.

Hazırlanan mafsallı robot kol BCN3D Moveo referans alınarak geliştirildi. Adı geçen robot kol açık kaynaklı olması ve de 3D yazıcıdan basılabilir olması robot kolun avantajları arasındadır. Öte yandan robot kolun eklemleri referans robot kolun eklemlerine bağlı kalarak tekrar SolidWorks yazılımı üzerinden tasarlandı. Bu işlemin yapılmasının amacı, var olan geliştirilmiş, alanında profesyonel amaçlara uygun tasarlanmış robot kolun tasarım deneyimlerinden faydalanmaktır. Referans alınan eklemlerin tekrar tasarlanmasının amacı ise robot kolun çalışma uzayının istenildiği ölçülerde genişletilip daraltılabilmesine imkân tanınmasıdır. Robot kolun çalışma uzayı, robot kolun uç efektörünün erişebildiği çalışma uzayındaki noktaları ifade etmektedir. Robot kol sabit bir tabana yerleştirilmiş (Şekil 1) ve robot kolun kinematik analizinin yapılabilmesi için gerekli olan koordinat çerçevesi ataması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Robot kol koordinat çerçevesi

Figure 2. Robot arm in coordinate frame

Şekil 2’de gösterildiği gibi mafsallı açık kaynak robot kolun 3 ve 4 eklemleri birbirine twisting joint ile bağlıdır. Uç efektörün konumunun robotik sistemlerde serbestlik derecesine bağlıdır. Uç efektörün konumunun bulunması analizine ileri kinematik analizi denir. Uç efektörünün koordinat eksenindeki konumunun belirlenmesi, robot kolun çalışma uzayının ortaya çıkartılması açısından önemlidir. Analitik yöntem ya da Denavit-Hartenberg yöntemi ileri kinematik analizi için uygulanan en sık yöntemdir (Denavit ve Hartenberg, 1955). 5 DoF serbestlik derecesine sahip robotik kolun her ekseninin dönel eklemleri Şekil 1’de gösterilmektedir ve devamında her bir eklemin koordinat sistemi üzerindeki komşu eklemleri arasındaki ilişkiyi tanımlayan dönüşüm matrisi verilmiştir. Birbirine bağlı iki eklemin arasındaki ilişkinin dönüşüm matrisi ${}^{i-1}T_i$ olarak gösterilir. “i” uzuv numarasını simgeler iken birbirine bağlı eklemlerin oluşturduğu homojen dönüşüm matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} {}^{i-1}R & D \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ardından, elde edilen tüm matris çarpımları

$${}^0T = {}^0T_1T_2T_3T_4T_5T_eT \quad (2)$$

“e” karakteri koordinat ekseninde uç efektörünü simgeler, ${}^{i-1}T_i$ i’den i-1 arasındaki koordinatlar arasındaki dönüşüm ilişkisini ifade ederken, ${}^{i-1}R_i$ i’den i-1 arasındaki koordinatlar arasındaki devinim ilişkisini ifade eder. Homojen dönüşüm matrisi içerisindeki diğer matrisler hesaplanır iken uç efektörü koordinatından taban koordinatı elde edilir (Wu ve diğ., 2014). Hesaplama işlemi gerçekleştirilir iken taban koordinatından transformasyon matrisi uç efektörünün koordinatı elde edilir.

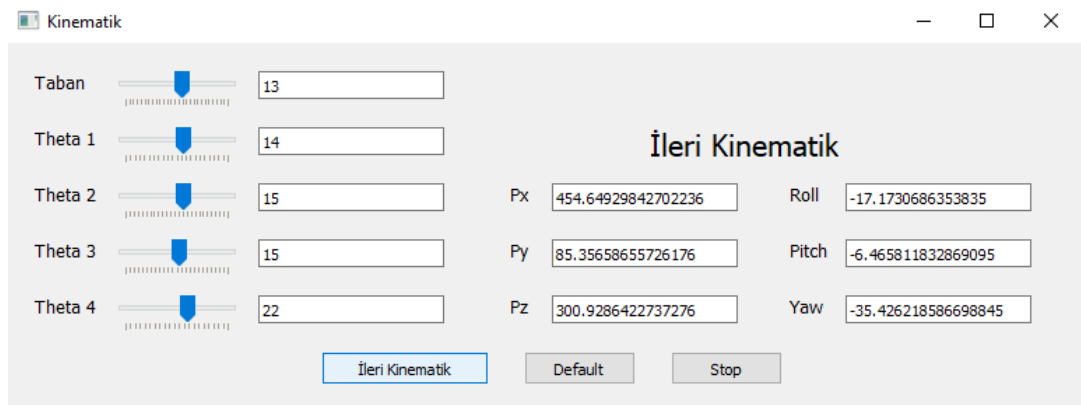
Birbirine bağlı eklemlerin konumu ve rijit eklemlerin yönelimleri birleşim yerlerine göre sabitlenmiş koordinat sistemleri ile tanımlanabilir (Wu ve diğ., 2014). Bu nedenle her aktif eklemin koordinat sistemi üzerinde yerleştirilmesi gerekmektedir (Denavit ve Hartenberg, 1955) ve koordinat sistemi üzerine yerleştirilen rijit eklemler Şekil 2’de resmedilmiştir. Şekil 2’de gösterilen robot kol 3D yazıcılar üzerinden basılabilen profesyonel BCN3D Moveo açık kaynak robot koludur (Github). Koordinat sistemi 1 ile oluşturulur ve temel koordinat sistemi 0 ile çakışır. Z eksenini her dönel eklemin eksenine paralel olmak ile beraber Z ekseninin yönü dönme yönü ile belirlenir ve geleneksel olarak sağ el kuralı ile sabitlenir. İlk eksenin devamındaki her eksen bir önceki eksen ile birebir tutarlı olmak zorundadır. Sistemin son eksenini sağ el kuralı ile belirlenir iken ayrıca koordinat sistemindeki boyut parametrelerinin de belirtilmesi gerekmektedir.

Aşağıda homojen dönüşüm matrisinin tüm bileşenleri gösterilmektedir.

$${}^0T = {}^0T_1T_2T_3T_4T_5T_eT = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Çalışma kapsamında açık kaynak medikal yardımcı robot kolun kinematik analizi python yazılım dilinde hazırlandı. İleri ve geri kinematik analiz, python yazılımı üzerinde grafik ara yüzü geliştirilerek test edildi.



Şekil 3. Python ile hazırlanan ileri kinematik analiz kullanıcı modülü

Figure 1. Forward kinematic analysis user module prepared in Python

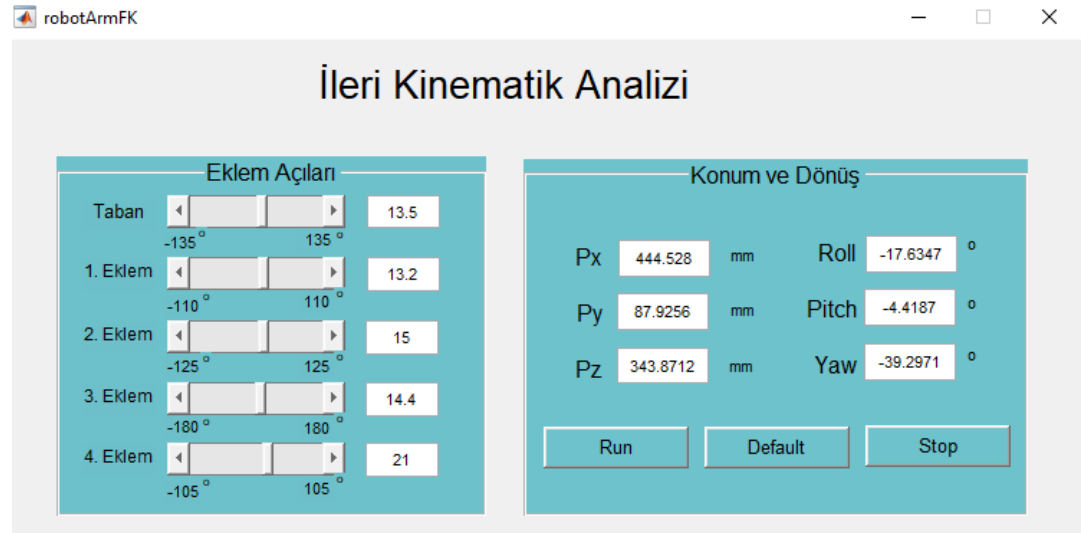
Şekilde gösterildiği gibi model sistem tasarlanmış GUI tarafından kontrol edilen sistem simüle edildi. Şekilde 5 aktif eklem bulunmaktadır. 3 ve 4 eklemler twisting joint şekli ile birbirine bağlı.

Aşağıda tasarlanan fonksiyonlar GUI'ye dahil edildi (Şekil 3)

- simülasyon sürecini kontrol etmek
- eklem açısı bilgilerinin iletilmesi ve gözden geçirilmesi
- manipülatörün poz bilgilerinin elde edilmesi

şekilde açık kaynak medikal robotun resmi gösterilmektedir.

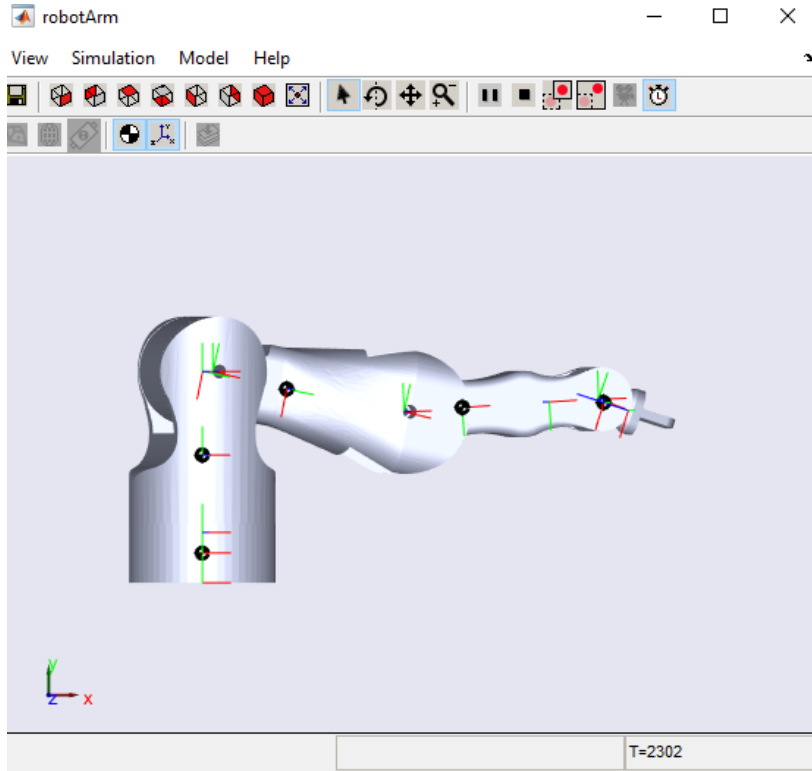
Python yazılım dili ile hazırlanan modülün avantajları arasında yazılım dilinin açık kaynaklı olmasıdır. Açık kaynaklı mafsallı robot kol için Matlab yazılım dili ile hazırlanmış modülü ise Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Matlab ile hazırlanan ileri kinematik analiz kullanıcı modülü

Figure 2. Forward kinematic analysis user module prepared in Matlab

Her iki modülde elde edilen değerler scrollbardan kaynaklı olabildiğince yakın belirlenmeye çalışıldı ve Px, Py ve Pz sonuçlarının da birbirlerine yakın elde edildiği görülmektedir. Python yazılım dilinde hazırlanan modül açık kaynaklı ve yazılımdan kaynaklı telif hakkının istenmemesinden kaynaklı Matlab yazılım dilinde hazırlanan modüle kıyasla öne çıkan avantajları bulunmaktadır. Python ile hazırlanan ileri kinematik analizi modülünde elde edilen robotun muhtemel şekli aşağıdaki Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekil 5'te elde edilen simülasyon Matlab üzerinde çalışan Simülink yazılımı sayesinde elde edilmektedir.



Şekil 5. Matlab ile elde edilen robot kol simülasyonu

Figure 2. Simulation of robot arm obtained by Matlab

Öte yandan Python yazılımı üzerinden hazırlanan modülde sonuçlar harici bir yazılımın çalıştırılmasına gerek duyulmadığı için hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Sonuçların doğruluğu Matlab yazılımı ile karşılaştırıldığında örtüştüğü görülmektedir. Matlab yazılımında sonuçlar Matlab yazılımı üzerinde çalışan Simülink yazılımı ile robot kolun çalışma uzayında alması muhtemel şeklin elde edilmesine imkân verdiği için referans kabul edilirse, Python yazılımı ile hazırlanan modüldeki sonuçların örtüşmesi sonuçların doğruluğunu göstermektedir. Homojen matrix hesaplaması sonucunda elde edilen sonuçlar Matlab yazılımında çalıştırılması için Simülink yazılımının aktive edilmesi simülasyonun çalıştırılması gerekmektedir. Bu durumda Matlab yazılımında hazırlanan modülde sonuçların elde edilmesi, kullanılan bilgisayarın hızına bağlı olarak belirli bir zaman almaktadır. Öte yandan Python yazılımı üzerinden hazırlanan modül ise yukarı da değinildiği üzere harici bir yazılımın çalıştırılmasına ihtiyaç duymadığı için daha hızlı hesaplama sonuçlarını vermektedir.

Bu makalede medikal yardımcı 5 DoF serbestlik derecesine sahip, açık kaynak robot kol örneği 3D yazıcıdan basıldı ve kinematik analizi yapıldı. Robot kolun ileri ve ters kinematik analizi simülasyon modülü üzerinden test edildi. Kinematik denklemi homojen dönüşüm teorisi ile çözüldü. Python yazılımı ile çalışmanın GUI ara yüzü hazırlandı. Çalışma kapsamında hazırlanan robot kolun profesyonel düzeyde 5 DoF serbestlik derecesine sahip ve de açık kaynak olmasının en büyük ayrıcalığı üretim maliyetinin düşük olmasıdır. Sağlık çalışanlarının iş yükünün az da olsa giderilmesi hedeflenmektedir. Örneğin ilaç hazırlama ünitesinde sesli mesajlara göre üzerinde bulunan barkodların görüntü işleme ile tanınması ilgili ilacın sağlık çalışanına robot kol ile verilmesi. Laboratuvar ortamında ilgili materyallerin robot kol ile belirlenen ortama yerleştirilmesi vb. gibi çalışmalarda kullanılabilir. Çalışmanın bir sonraki aşamasında birden fazla robotun kolun paralel çalışması ile oluşturulacak robotik sistemler ve yapay zekâ tabanlı uygulamalar akıllı robotik sistemler tasarlanacaktır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (CONCLUSION AND DISCUSSIONS)

Açık kaynak 5 DoF serbestlik derecesine sahip robot kolun kinematik analizi yapıldı. Yapılan kinematik analiz işlemi ile robot kolun çalışma uzayı belirlendi. Buna dayanarak D-H parametre tablosu oluşturuldu ve buna bağlı homojen dönüşüm teorisine bağlı analiz yapıldı. Açık kaynak robot kolun ileri ve geri kinematik analizi Python yazılımı üzerinden yapıldı. Analiz işlemi için Python üzerinden GUI arayüz oluşturuldu. Çalışmanın ilerleyen safhalarında ileri kinematik analizin yanı sıra ters kinematik analizinde yapılması ve Python yazılım dili robot kolun simülasyonunun elde edilmesi olacaktır. Python yazılım dilinin Matlab gibi kendi açısından profesyonel çalışmaların yapıldığı yazılım diline kıyasla en büyük avantajı açık kaynak olmasıdır. Ayrıca Python yazılım dili hazırlanan kinematik analizleri ile çalışma uzayının belirlenmesi ve olası çarpma risklerinin görülmesi açısından train-test edilebilme imkânı taşımaktadır. Python yazılımının bu özelliği sayesinde kinematik analizi makine öğrenmesi metotları ile iyileştirilebilir. Bu makalenin özellikle açık kaynak profesyonel ölçeklerde çalışabilen robot kolların kinematik analizi işleminin yapılması ve kullanılması açısından ilham vermesini umuyorum.

Gelişen teknoloji imkanları kullanılarak hazırlanabilecek ve geliştirilmesi muhtemel profesyonel ölçekteki robotik sistemler yine ileri teknoloji ürünü olan 3D yazıcılar üzerinden basılabilir ve kullanılabilir. Thingiverse web sayfasından paylaşımı yapılan açık kaynaklı profesyonel robotik sistemin kaynak eklemeleri referans alınarak tekrar geliştirilip 3D yazıcı üzerinden basıldı (Thingiverse). Geliştirilen ve 3D yazıcı üzerinden basımı gerçekleştirilen robot kolun özellikle pandemi sürecinde sağlık çalışanları için iş yükü azaltıcı bir etki oluşturması umulmaktadır. Örneğin hastane ortamında materyal kabul bölümünde çalışan sağlık çalışanları, ilaç hazırlama ünitesinde çalışan hemşire ya da hemşireler ya da sağlık çalışanlarına ve dahi sağlık birimlerinde bulunan diğer ünitelerde kullanılması mümkündür. Kinematik analizi için hazırlanan Python dilindeki açık kaynaklı yazılım istenildiğinde paylaşımı gerçekleştirilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aspragathos NA, Dimitros JK, 1988. A comparative study of three methods for robot kinematics. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part B: Cybernetics, vol. 28, no. 2.
- Funda J, Paul RP, 1988. Manipulator kinematics and epsilon algebra, IEEE J. Robot. Automat., vol. 4.
- Kim JH, Kumar VR, 1990. Kinematics of robot manipulator via line transformations, J. Robot. Syst., vol. 7, no. 4, pp. 649-674.
- Maxwell EA, 1900. General homogeneous coordinates in space of three dimensions, Cambridge. U. K.: Cambridge Univ. Press.
- Denavit J, Hartenberg RS, 1955. A kinematic notation for Lower-pair mechanisms based on matrices, ASME Jappl. Mechan. pp. 215-221.
- Ball RS, 1900. The theory of screws, Cambridge. U. K.: Cambridge Univ. Press.
- Liu Y, Wang D, Sun J, Chang L, Ma CX, Ge Y, Gao L. 2015. Geometric approach for inverse kinematics analysis of 6-dof serial robot, IEEE International Conference on Information and Automation, pages 852-855.
- Qiao S, Liao Q, Wei S, Su H, 2010. Inverse kinematic analysis of the general 6R serial manipulators based on double quaternions, Mechanism and Machine Theory 45, 193-199.
- Nubiola A, Bonev IA, 2014. Geometric approach to solving the inverse displacement problem of Calibrated decoupled 6R serial robots, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering 38, 31-44.
- Almusawi ARJ, Dülger LC, Kapucu S, 2016. A new artificial neural network approach in solving inverse kinematics of robotic arm (denso vp6242), Computational Intelligence and Neuroscience.
- Köker R, 2013. A genetic algorithm approach to a neural-network-based inverse kinematics solution of robotic manipulators based on error minimization, Information Sciences 222, 528-543.
- Duka AV, 2014. Neural network based inverse kinematics solution for trajectory tracking of a robotic arm, Procedia Technology 12, 20-27.

- Uchiyama M, Iwasawa N, Hakomori K, 1987. Hybrid position/force control for coordination of two-arm robot. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1242–1247.
- Kopf CD, Yabuta T, 1988. Experimental comparison of master/slave and hybrid two arm position/force control, in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 3, pp. 1633–1637.
- Corke PI. 1996. “A robotics toolbox for matlab,” IEEE Robotics Automation Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 24–32.
- Kelmar L, Khosla PK. 1990. Automatic generation of forward and inverse kinematics for a reconfigurable modular manipulator system. Journal of Robotic Systems, vol. 7, no. 4, pp. 599–619, 1990. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/rob.4620070406>.
- Wu Y, Cheng LH, Fan GF, Wang CD, 2014. Inverse kinematics solution and optimization of 6-DOF handling robot. Appl Mech Mater 635–637:1355–1359.
- Github: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo> (10/06/2020).
- Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/thing:1693444> (10/06/2020).



GRAFEN NANO PLAKALARLA TAKVİYE EDİLMİŞ Al-5,5Cu-0,5Mn MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Nazlı AKÇAMLI

Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Yıldırım, Bursa, TÜRKİYE
nazli.akcamli@btu.edu.tr

(Geliş/Received: 15.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.02.2021)

ÖZ: Bu çalışmada, grafen nano plakalar (GNP) ile takviye edilmiş Al-ağ.%5,5 Cu-ağ.%0,5 Mn matrisli kompozitler toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiştir. Başlangıç tozlarının 8 saate kadar mekanik alaşımlanması ile üretilen Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP (x: ağ.% 0, 0,5 1 ve 2) kompozit tozları, 650 MPa altında ön şekillendirilmiş ve takiben 600 °C'de 2 saat Ar atmosferi altında basınçsız olarak sinterlenmiştir. Üretilen Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozit numunelerinin mikroyapısal, mekanik ve korozyon özelliklerinin belirlenmesi için X-ışınları difraksiyonu (XRD), taramalı elektron mikroskopu-enerji dağılım spektrometresi (SEM-EDS), mikrosertlik ve korozyon testleri yapılmıştır. Üretilen Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin mikroyapısında Al₂Cu intermetalik fazı tespit edilmiş ve mekanik alaşımlanmış numunelerde karbür fazı oluşumuna rastlanmıştır. Optimum mekanik alaşımlama süresi 4 saat olarak belirlenmiş ve bu numunelerde grafen katkısı ile sertlik değerlerinin artarak Al-5,5Cu-0,5Mn-2GNP kompozit numunesi için 123 HV'e ulaştığı belirlenmiştir. Ayrıca, grafen katkısının Al esaslı matrisin korozyon direncini düşürdüğü belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-Cu matris kompozit, Grafen, Mekanik Özellikler, Korozyon Direnci.

Powder Metallurgical Fabrication and Characterization of Graphene Nano Platelets Reinforced Al-5.5Cu-0.5Mn Matrix Composites

ABSTRACT: In this study, graphene nano platelets (GNPs) reinforced Al-5.5wt.%Cu-0.5wt.%Mn matrix composites were produced by the powder metallurgy method. Al-5.5Cu-0.5Mn-xGNP (x: 0, 0,5 1 ve 2 wt.%) composite powders produced by mechanical alloying of the starting powders up to 8 h were pre-compacted via uniaxial pressing under 650 MPa and subsequently pressurelessly sintered at 600 °C for 2 hours under Ar atmosphere. The microstructural, mechanical and corrosion properties of Al-5.5Cu-0.5Mn-xGNP composites were investigated via X-ray diffractometer (XRD), scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), microhardness and corrosion tests, respectively. Al₂Cu intermetallic phase was detected in the microstructure of the composites and carbide phase formation was observed in the mechanically alloyed composites. The optimum mechanical alloying duration was determined as 4 hours and it was observed that the hardness of these composites increased by the increasing graphene amount and reached to 123 HV for Al-5.5Cu-0.5Mn-2GNP sample. Moreover, the corrosion resistance of Al-based matrix worsened by the graphene addition.

Key Words: Al-Cu matrix composite, Graphene, Mechanical Properties, Corrosion Resistance.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek üretim kapasiteleri, hafiflik, iyi elektriksel-termal iletkenlik ve korozyon direnci, alüminyum ve alaşımlarını pek çok yapısal uygulama, alt yapı ve elektronik endüstrileri için uygun bir malzeme

haline getirmektedir [Davis, 1993; Kumar ve Kumar, 2015]. Diğer taraftan, havacılık, otomotiv ve savunma endüstrileri tarafından talep edilen ileri malzeme ihtiyaçlarını karşılamada alüminyum ve alaşımları mekanik özellikleri ve aşınma dayanımları nedeniyle sınırlı kalmaktadır [Kumar ve Kumar, 2015; Saravanan ve diğ., 2015]. Çeşitli alüminyum alaşımları içerisinde, Al-Cu-Mn-Mg (Al 2XXX) sistemine dayanan alüminyum alaşımları yüksek mekanik dayanımları ve ısı ile sertleştirilebilir özellikleri nedeniyle yüksek performanslı alüminyum alaşımı grubuna dahildirler. Bu alaşımlar, havacılık ve otomotiv uygulamalarında düşük yoğunlukları, yüksek mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri sayesinde kullanılmakta olup, bu özelliklerin geliştirilmesi durumunda demir esaslı malzemelerin yerini alma potansiyeline sahiptirler [Lawrance ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2013; Meng ve diğ., 2016].

Mekanik alaşımlama (MA), homojen yapıya sahip bir malzeme üretmek için karışım halindeki başlangıç toz partiküllerinin yüksek enerjili bir değirmen içerisinde sürekli kaynaklanma, kopma ve yeniden kaynaklanmasına dayanan bir katı hal toz işleme tekniğidir [Suryanarayana, 2001]. Geleneksel alaşımlama metodlarına kıyasla mekanik alaşımlama (MA), örneğin çok ince taneli alaşımların elde edilmesi yanında kristal kafes içerisinde alaşım elementlerinin çözünürlüğünün artırılması ile aşırı doymuş katı çözeltilerin elde edilebilmesi gibi önemli avantajlar sağlamaktadır [Suryanarayana, 2001]. MA'nın ayırt edici özelliklerinden biri elementel tozlardan artan çözünürlük limitlerine sahip katı çözeltilerin oluşmasıdır. Yüksek enerjili değirmenlerde MA ve takiben sinterleme kademelerini içeren ileri toz metalurjisi teknikleri, geleneksel ergitme metodlarına göre daha düşük sıcaklıklar kullanarak matris fazı ve takviye elemanları arasında istenmeyen fazların oluşmasının önüne geçer [Suryanarayana, 2001]. Ayrıca, metal matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri olan ikincil fazın matris içerisinde homojen olarak dağıtılamaması ve takviye elemanının topaklanması bu yöntemle önenebilir [Suryanarayana, 2001].

Son yıllarda, örneğin Al₂₀₂₄ gibi nano yapıya sahip alüminyum alaşımları ile yapılan çalışmalar mekanik alaşımlama ve süreçleri üzerinde yoğunlaşmıştır [Bustamante ve diğ., 2011; Woo ve Zhang, 2004; Yazdian ve diğ., 2010]. Bustamante ve diğerleri, 30 saate kadar mekanik alaşımlama ile %5'e kadar karbon nano tüp (KNT) içeren Al₂₀₂₄-KNT kompozit tozlarını hazırlamış ve basınçsız sinterleme ile kompozit numuneler üretmiştir. Üretilen kompozitlerin yapısında Al₂Cu ve Al₄C₃ fazları belirlenmiş ve kompozit numunelerin sertliklerinde önemli bir artış elde edildiği belirtilmiştir [Bustamante ve diğ., 2011; Bustamante ve diğ., 2013]. Bu çalışmalar dışında, literatürde çoğunlukla ticari olarak temin edilen Al alaşımlarına mekanik öğütme uygulanarak mikron altı veya nano boyutta Al toz alaşımlarının hazırlanması üzerine yapılmış bazı çalışmalar mevcuttur [Fogagnolo ve diğ., 2003; Jafari ve diğ., 2009; Hosseini ve diğ., 2009; Zhou ve diğ., 2001]. Diğer taraftan, Al-esaslı alaşımların elementel tozlardan mekanik alaşımlama ile üretilmesi üzerinde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, genellikle 500 devir/dakika hızlarına kadar çıkabilen nispeten düşük enerjili sayılabilecek öğütücüler kullanılmıştır. Ayrıca, mekanik alaşımlama ile üretilen bu tozlardan elde edilmiş yığın yapıdaki alaşımların detaylı mekanik ve korozyon testlerini içeren çalışmalar oldukça az sayıdadır.

Bugüne kadar oksitler, karbürler, grafit ve karbon nano tüpler (KNT) gibi çeşitli formlardaki karbon esaslı malzemeler takviye elemanı olarak alüminyuma ilave edilerek birçok araştırma yapılmıştır [Bodunrin ve diğ., 2015; Doel ve Bowen, 1996; Latief ve diğ., 2011; Kaczmar ve diğ., 2000]. Bu takviye malzemelerine kıyasla, grafen üstün mekanik, termal ve elektriksel özellikleri ile öne çıkmaktadır. Grafen, karbon atomları arasındaki güçlü kovalent sp² bağları sayesinde yüksek mekanik, termal ve kimyasal kararlılığa sahiptir. Young modülü ve kırılma tokluğu sırasıyla 1,0 TPa ve 130 GPa olarak verilen grafen birim ağırlık başına en mukavemetli malzemelerden biridir [Edwards ve Coleman, 2013; Prashantha ve diğ., 2014; Rafiee ve diğ., 2010].

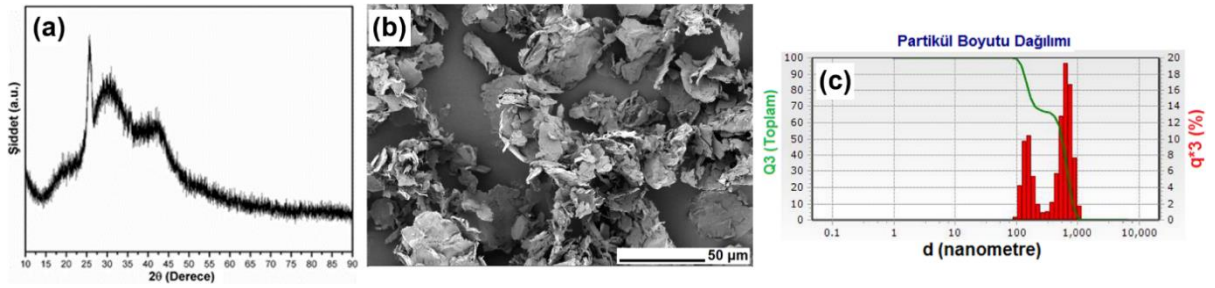
Bu çalışmada, Al- ağı. %5,5 Cu- ağı. %0,5 Mn matrisli ve grafen ile takviye edilmiş kompozitler mekanik alaşımlama, soğuk presleme ve basınçsız sinterleme kademelerinden oluşan toz metalurjisi prosesi ile üretilmiş ve mekanik alaşımlama süresi ve grafen takviyesi miktarının mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elementel tozlardan başlanarak Al-5,5Cu-0,5Mn bileşimindeki alaşımların ve grafen takviyeli kompozitlerin yüksek enerjili mekanik alaşımlama ile üretimi ulaşılabilir

literatürde daha önce yer almamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın gelişmiş özelliklere sahip Al matris kompozitlerin üretimine katkı vereceği düşünülmektedir.

MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

Kullanılan Malzemeler (Raw Materials)

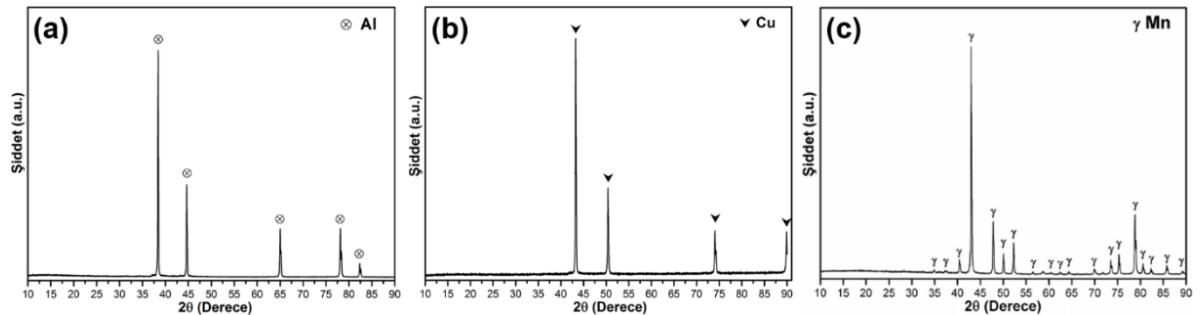
Bu çalışmada kullanılan grafen nano plakalar (GNP)'ın (Sigma Aldrich, 25 μm) X-ışınları difraktometresi (XRD, Bruker D8)) ile belirlenen faz yapıları Şekil 1a'da verilmiştir. Buna göre GNP'lerin yüksek safiyette ve amorf yapılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, GNP'lerin mikroyapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM, Carl Zeiss/Gemini 300) kullanılarak incelenmiş ve grafen tozlarının kırışık yüzeyli levhasal partiküllerden oluştuğu ve boyutlarının 20 ila 50 μm arasında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 1b). GNP'lerin ortalama partikül boyutları, Nano-Flex Zeta Potansiyeli/Nano Partikül Ölçüm Cihazı ile yapılan ölçümlere göre 549,7 nm'dir (Şekil 1c).



Şekil 1. Grafen nano plakaların: (a) XRD deseni, (b) SEM görüntüsü ve (c) partikül boyutu ölçüm grafiği.

Figure 1. (a) XRD pattern, (b) SEM image, and (c) particulate size distribution of graphene nano platelets (GNPs).

DeneySEL çalışmalarda Al (Alfa Aesar, -325 mesh, %99,5), Cu (Alfa Aesar, -325 mesh, %99) ve Mn (Alfa Aesar, -325 mesh, %99,3) tozları başlangıç hammaddeleri olarak kullanılmıştır. Başlangıç tozlarının Şekil 2a-c'de verilen XRD desenleri, Al, Cu ve Mn tozlarının herhangi bir kirlilik içermeyen saf hammaddeler olduğunu göstermektedir. Al tozlarının Carl Zeiss/Gemini 300 cihazı ile belirlenen Şekil 3a'daki SEM görüntüsünden yaklaşık 5-25 μm partikül boyutuna sahip düzensiz şekilli partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Al-5,5Cu-0,5Mn esaslı kompozitlerin üretimi için kullanılan başlangıç Al, Cu ve Mn tozlarının Malvern Mastersizer 3001 cihazında belirlenen partikül boyutları sırasıyla 10,9, 121 ve 36 μm 'dir.

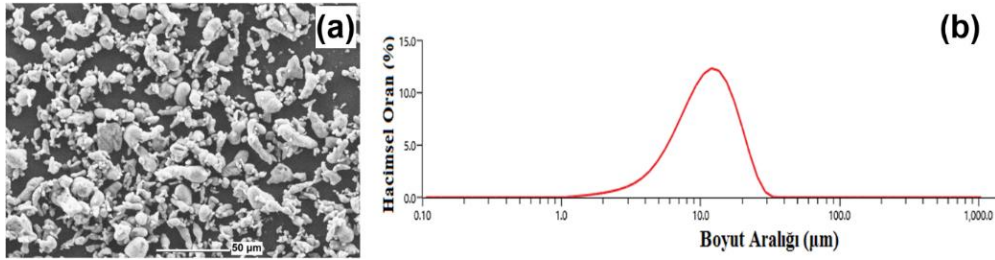


Şekil 2. Metalik hammadde tozlarının XRD desenleri: (a) Al, (b) Cu ve (c) Mn.

Figure 2. XRD patterns of the metallic raw materials: (a) Al, (b) Cu, and (c) Mn.

GNP ile Takviye Edilmiş Al-5,5Cu-0,5Mn Matrisli Kompozitlerin Üretimi (Production of GNPs Reinforced Al-5.5Cu-0.5Mn Matrix Composites)

Al-5,5Cu-0,5Mn alaşım tozları ve ağırlıkça %2'e kadar GNP ile takviye edilmiş kompozit tozlar 0, 2, 4 ve 8 saat mekanik alaşımlanarak üretilmiştir. Kuru toz karıştırma cihazında 2 saat süreyle karıştırılarak homojen hale getirilen tozlar karışım halindeki tozlar olarak isimlendirilmiştir. MA prosesinde ise karışım halindeki tozlar Ar atmosferi altındaki kapalı ortam kutusu içerisinde çelik öğütme kaplarına (hacim: 55 ml) alınmış ve Spex tipi yüksek enerjili bilyeli öğütücüde 1200 devir/dak öğütme hızı ve ağırlıkça 7:1 bilye:toz oranı ile 8 saate kadar öğütülmüştür. MA sırasında sünek metalik tozların topaklanmasını ve öğütücü ortama sıvanmasını önlemek için toz karışımlarına ağırlıkça %2 stearik asit (Merck, %97) ilave edilmiştir.



Şekil 3. Başlangıç Al tozlarının: (a) SEM görüntüsü ve (b) partikül boyutu dağılım grafiği.

Figure 3. (a) SEM images and (b) particulate size distribution of starting Al powders.

Mekanik alaşımlama ile üretilen Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozit tozları sinterleme prosesi ile yığın yapılar haline getirilmiştir. Karışım halindeki ve mekanik alaşımlanmış tozların tek eksenli pres (MSE LP/M2S10) ile 650 MPa altında ön şekillendirilmesi ile silindirik şekilli (çap: 16 mm) yaş numuneler hazırlanmıştır. Sinterleme işlemlerinde, öncelikle stearik asidin giderilmesi için yaş numuneler tüp fırın içerisinde Ar atmosferinde 420°C'de 2 saat bekletilmiş ve takiben Ar atmosferinde 600 °C'de 2 saat sinterlenmiştir. Bu çalışmada, üretilen toz ve yığın yapıları ürünler MA süresi ve GNP miktarına göre kısa isimlerle kodlanmış ve Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Üretilen kompozit numuneler ve kısaltılmış isimleri.

Table 1. The produced composite samples and their short names.

	Numune İsmi	MA Süresi (saat)	GNP miktarı (ağ. %)
1	AlCuMn-0sa	0	0
2	AlCuMn-2sa	2	0
3	AlCuMn-4sa	4	0
4	AlCuMn-8sa	8	0
5	AlCuMn-0,5GNP-0sa	0	0,5
6	AlCuMn-0,5GNP-2sa	2	0,5
7	AlCuMn-0,5GNP-4sa	4	0,5
8	AlCuMn-0,5GNP-8sa	8	0,5
9	AlCuMn-1GNP-0sa	0	1
10	AlCuMn-1GNP-2sa	2	1
11	AlCuMn-1GNP-4sa	4	1
12	AlCuMn-1GNP-8sa	8	1
13	AlCuMn-2GNP-0sa	0	2
14	AlCuMn-2GNP-2sa	2	2
15	AlCuMn-2GNP-4sa	4	2
16	AlCuMn-2GNP-8sa	8	2

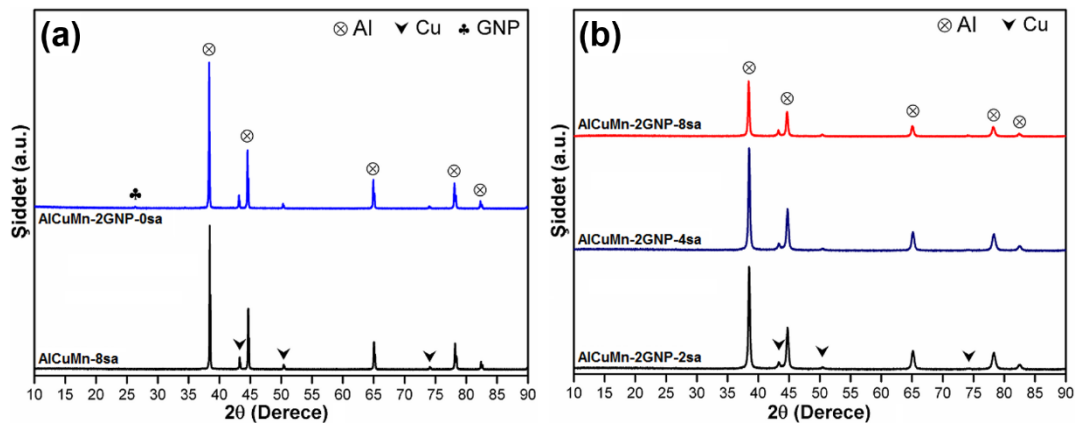
GNP ile Takviye Edilmiş Al-5,5Cu-0,5Mn Matrisli Kompozit Tozların ve Yığın Yapılı Ürünlerin Karakterizasyonu (Characterization of GNPs Reinforced Al-5.5Cu-0.5Mn Composite Powders and Sintered Products)

Toz ve yığın yapıları ürünlerin faz analizleri Bruker™ D8 Advanced Series X-ışını difraktometresinde (XRD) $\text{CuK}\alpha$ (1,54060 Å) radyasyonu ile yapılmıştır. Ayrıca, alüminyumun öğütme süresine bağlı olarak ortalama kristalit boyutu ve örgü gerinimi değerleri Williamson-Hall metodu ve Lorentzian kuralına göre Bruker™-AXS TOPAS 4.2 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Toz numunelerin termal davranışları, sinterleme sıcaklıklarının belirlenmesi için Linseis™ STS PT 1600 diferansiyel termal kalorimetre (DSC) cihazında N_2 atmosferi altında $5^\circ\text{C}/\text{dak}$ hız ile 700°C 'e kadar ısıtılarak incelenmiştir. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk değerleri Arşimet yoğunluk yöntemine göre belirlenmiştir. Sinter ürünlerin mikroyapıları Carl Zeiss/Gemini 300 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında gözlenmiştir. AlCuMn-xGNP kompozitlerinin sertlik değerleri Qness™ HV5 Mikrosertlik Cihazı ile 100 g yükün 10 s boyunca uygulanması ile en az 15 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Elektrokimyasal korozyon testleri CH Instruments™ Electrochemical Analyzer/Workstation (CHI608E) cihazında, %3,5'lik NaCl çözeltisinde yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Mekanik Alaşımlanmış Tozların Mikroyapısal ve Termal Özellikleri (Microstructural and Thermal Properties of MAed Powders)

Karışım halindeki ve mekanik alaşımlanmış bazı tozların sırasıyla Şekil 4a ve b'de verilen XRD desenlerinde Al (ICDD Kart No: 04-0787, Bravais kafesi: yüzey merkezli kübik, $a=b=c=0.405$ nm), Cu (ICDD Kart No: 27-1402, Bravais kafesi: yüzey merkezli kübik, $a=b=c=3.62$ nm) ve grafit (ICDD Kart No: 56-0159, Bravais kafesi: basit hekzagonal, $a=b=0.246$ nm, $c=0.671$ nm) fazları belirlenmiştir. GNP fazı mekanik alaşımlanmış tozlarda XRD tespit limitlerine (\sim ağ. %2) yakın düşük miktarı, amorf yapısı ve şiddetli Al pikleri tarafından baskılanması nedeniyle belirlenememiştir. Mn fazı benzer şekilde tespit limitleri altındaki miktarı nedeniyle izlenememiştir. Ayrıca, mekanik alaşımlanmış tozlarda Al ve Cu arasında herhangi bir intermetalik faz oluşumuna rastlanmamıştır. Bununla birlikte, Şekil 4a ve b'den artan mekanik alaşımlama süresi ile birlikte pik şiddetlerinin azalarak genişliklerinin arttığı gözlenmektedir. Mekanik alaşımlama sırasında partikül boyutunun azalması ve latis deformasyonu nedeniyle XRD piklerinde bu değişimler gözlenmiştir.

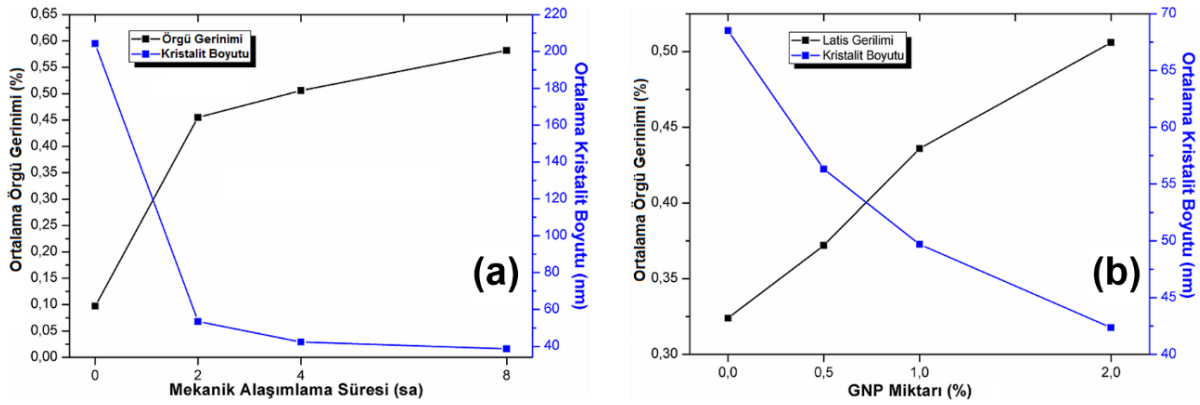


Şekil 4. (a) karışım halindeki ve (b) mekanik alaşımlanmış bazı tozların XRD desenleri.

Figure 4. XRD patterns of some powders: (a) as-blended and (b) MAed.

Şekil 5a, AlCuMn-2GNP tozlarının mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak ortalama örgü gerinimi ve kristalit boyutu değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 5a'ya göre mekanik alaşımlanmış Al-5,5Cu-0,5Mn esaslı tozların kristalit boyutları öğütme süresi arttıkça azalmaktadır. Ayrıca, artan öğütme süresi ile birlikte örgü gerinimi değerlerinin de giderek arttığı görülmektedir. MA prosesi partiküllerin

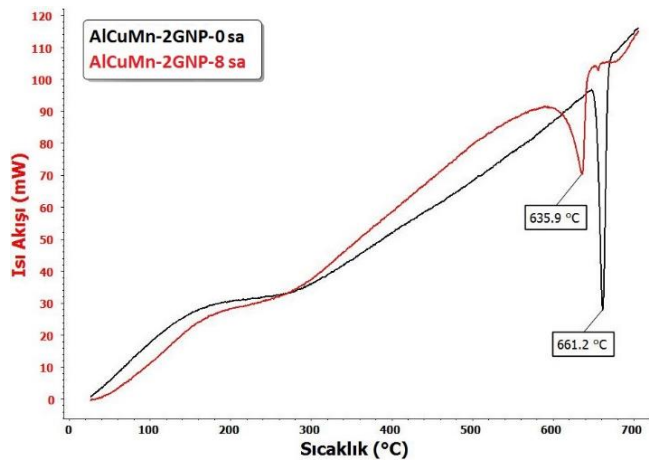
sürekli kaynaklanma, kopma ve yeniden kaynaklanması yoluyla partikül ve kristalit boyutlarında azalma meydana gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca, maruz kaldıkları mekanik deformasyon nedeniyle partiküllerin örgü gerinimleri artmaktadır [Suryanarayana, 2001]. Örgü gerinimi ve kristalit boyutu değerlerine grafen miktarının etkisi sabit süre (4 saat) mekanik alaşımlanmış AlCuMn-xGNP-4sa tozları için incelendiğinde (Şekil 5b), artan grafen miktarı ile birlikte örgü gerinimi değerleri artarken, kristalit boyutu değerlerinin azaldığı görülmektedir. Mekanik alaşımlama sırasında sert seramik partiküllerin öğütücü unsur olarak davranarak çatlak oluşumu başlangıcını ve böylece ufalanmayı hızlandırdığı bilinmektedir [Varol ve Çanakçı, 2015]. Bu nedenle, grafen plakalar benzer şekilde partikül boyutu düşüşünü ve örgü gerinimi artışını belirli ölçüde hızlandırmıştır.



Şekil 5. Mekanik alaşımlanmış tozların: (a) öğütme süresine ve (b) GNP miktarına bağlı olarak kristalit boyutu ve örgü gerinimi değerlerindeki değişim.

Figure 5. Change of crystallite size and lattice strain values of the MAed powders according to: (a) milling duration and (b) GNPs amount.

Sinterleme sıcaklığının belirlenmesi için 0 ve 8 saat öğütülmüş AlCuMn-2GNP tozlarına 700 °C'e kadar DSC analizi uygulanmıştır. Karışım halindeki (0 saat) ve 8 saat öğütülmüş AlCuMn-2GNP tozlarının Şekil 6'da verilen DSC eğrilerinde sırasıyla yaklaşık 661,0 °C ve 635,9 °C'de endotermik pikler gözlenmektedir. Buna göre, mekanik alaşımlanmış AlCuMn-2GNP tozları alaşım davranışı göstermekte iken karışım halindeki tozlar bağımsız davranarak saf Al'un ergime noktasına oldukça yakın bir sıcaklıkta ergimektedir.

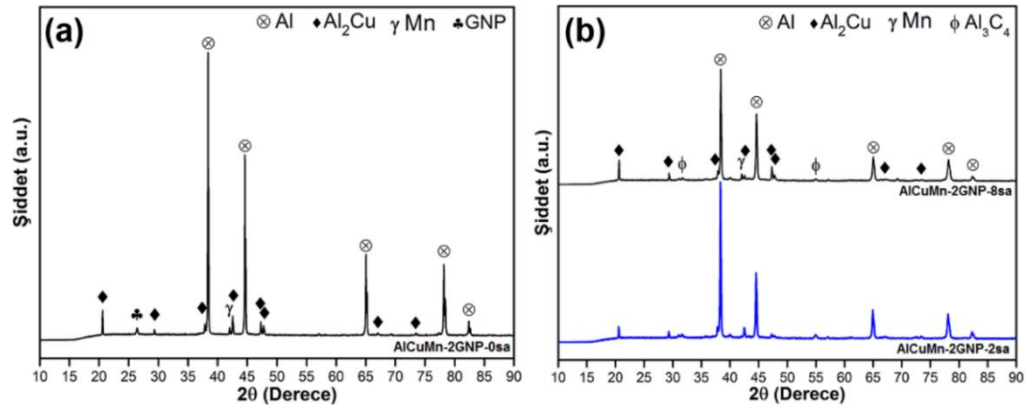


Şekil 6. AlCuMn-2GNP-0sa ve AlCuMn-2GNP-8sa tozlarının DSC eğrileri.

Figure 6. DSC curves of the AlCuMn-2GNP-0h and AlCuMn-2GNP-8h powders.

Yığın Yapılı Kompozitlerin Mikroyapısal, Mekanik ve Elektrokimyasal Özellikleri (Microstructural, Mechanical and Electrochemical Properties of Sintered Composites)

Karışım halindeki ve mekanik alaşımlanmış (2 ve 8 saat) tozlardan üretilen AlCuMn-2GNP kompozitlerinin sinter sonrası XRD desenleri sırasıyla Şekil 7a ve b'de verilmiştir. AlCuMn-2GNP-0sa kompozit numunesinin XRD desenlerinde Al, Mn, grafen ve Al₂Cu (ICDD Kart No: 01-089-1989, Bravais kafes: hacim merkezli tetragonal, a=b=0,6063 nm, c=0,4872 nm) fazları belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama ile üretilen AlCuMn-2GNP kompozitlerinde ise Al, Mn, Al₂Cu ve Al₄C₃ (ICDD Kart No: 79-1736, Bravais kafes: rombohedral, a=b=0,3335 nm, c=2,4967 nm) fazları dedekte edilmiştir. Mekanik alaşımlama sonrası AlCuMn-2GNP kompozitlerinin XRD desenlerinde (Şekil 4) yer almayan Al₂Cu fazının sinterleme sırasında oluştuğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, yapıda Cu fazına rastlanmaması, Cu fazının Al matris içerisinde çözüldüğünü ve büyük ölçüde Al₂Cu fazına dönüştüğünü göstermektedir. Bunun yanında, mekanik alaşımlanmış kompozitlerin yapısında örneğin oksidasyon sonucu oluşabilecek herhangi bir kirliliğe rastlanmamıştır.



Şekil 7. (a) Karışım halindeki ve (b) mekanik alaşımlanmış tozlardan üretilen (2 ve 8 sa) AlCuMn-2GNP kompozitlerinin XRD desenleri.

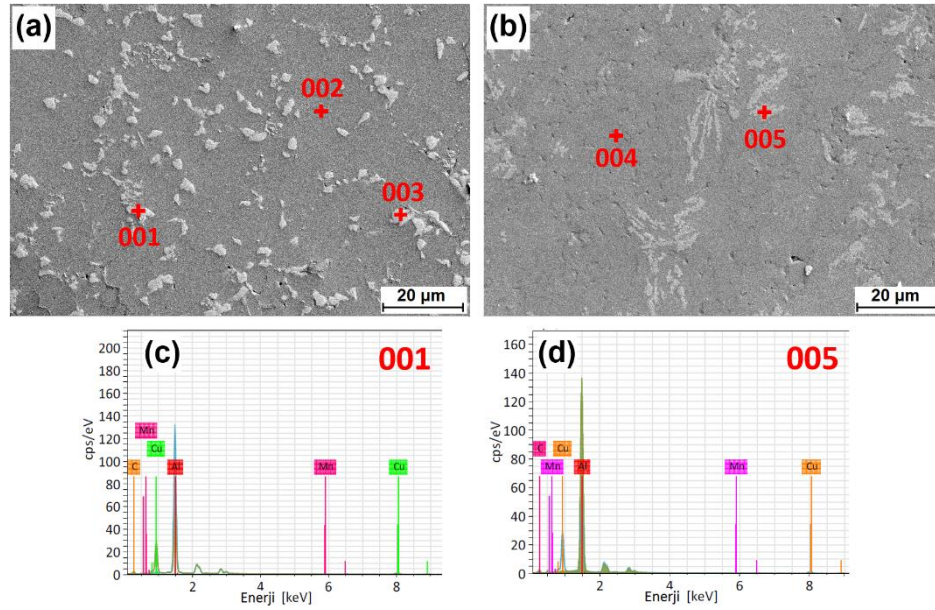
Figure 7. XRD patterns of the Al-5.5Cu-0.5Mn-2GNP composites fabricated from as-blended and MAed (2 and 8 h) powders.

Al-5,5Cu-0,5Mn alaşımlarının ve ticari grafen ile takviye edilmiş kompozitlerin teorik ve Arşimet yoğunlukları ile sinterleme işlemleri sonrası ulaştıkları relatif yoğunluk değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Mekanik alaşımlama ile üretilen numunelerin relatif yoğunluklarının %89,7 ile %99,0 arasında değiştiği ve relatif yoğunlukların öğütme süresine ve GNP miktarına bağlı olarak farklı değerler gösterdikleri görülmektedir.

Çizelge 2. Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin teorik, Arşimet ve relatif yoğunlukları.*Table 2. Theoretical, Archimedes and relative density values of Al-5.5Cu-0.5Mn-xGNP composites.*

Numune Adı	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Arşimet Yoğunluğu (g/cm ³)	Relatif Yoğunluk (%)
AlCuMn-0sa	2,8171	2,6825	95,2
AlCuMn-2sa		2,6697	94,8
AlCuMn-4sa		2,5841	91,7
AlCuMn-8sa		2,6462	93,9
AlCuMn-0,5GNP-0sa	2,8104	2,6565	94,5
AlCuMn-0,5GNP-2sa		2,7052	96,3
AlCuMn-0,5GNP-4sa		2,6049	92,7
AlCuMn-0,5GNP-8sa		2,6896	95,7
AlCuMn-1GNP-0sa	2,8038	2,6755	95,4
AlCuMn-1GNP-2sa		2,7738	98,9
AlCuMn-1GNP-4sa		2,6096	93,1
AlCuMn-1GNP-8sa		2,6675	95,1
AlCuMn-2GNP-0sa	2,7907	2,6091	93,5
AlCuMn-2GNP-2sa		2,7773	99,5
AlCuMn-2GNP-4sa		2,6423	94,7
AlCuMn-2GNP-8sa		2,5018	89,6

Karışım halindeki ve 4 saat mekanik alaşımlanmış tozlardan sinterlenen AlCuMn-2GNP kompozitlerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenen mikroyapıları sırasıyla Şekil 8a ve b'de verilmiştir. Sinterlenmiş kompozitlerin mikroyapılarında Al-Cu ikili faz diyagramına göre oluşması beklenen α -Al ve Al₂Cu fazları ile uyumlu olarak iki farklı faz dikkati çekmektedir [Lyman, 1973]. Matris içerisinde dağılmış ikincil fazların bileşimleri EDS analizleri ile incelenmiş ve Şekil 8a ve b'de 001 ve 005 olarak işaretlenen açık renkli fazların EDS spektrumları sırasıyla Şekil 8c ve d'de gösterilmiştir. Ayrıca, Şekil 8a ve b'de işaretlenen noktaların EDS analizleri ile belirlenen bileşimleri Çizelge 3'de verilmiştir. Buna göre, matris içerisinde bulunan bu fazların Al₂Cu intermetalik bileşiği olduğu anlaşılmaktadır. Mekanik alaşımlama uygulanmayan ve uygulanan kompozitlerde, bu fazların morfolojik özelliklerinde belirgin bir farklılık gözlenmektedir. AlCuMn-2GNP-0sa kompozit numunesinde Al₂Cu fazları yaklaşık 1-5 μ m arasında çapa sahip yuvarlağa yakın şekilli ve yuvarlatılmış köşeli bir yapıya sahipken (Şekil 8a), AlCuMn-2GNP-4sa numunesinde ise aynı faz çiçeksi bir şekil oluşturan kümeler (Şekil 8b) halinde bulunmaktadır. Literatürde, mekanik alaşımlama içeren toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al-ağ.%4Cu-xTiB₂ kompozitlerinin yapılarında benzer şekle sahip çiçeksi görünümlü Al₂Cu fazlarına rastlanmıştır [Kaftelen ve diğ., 2011].



Şekil 8. (a)-(c) AlCuMn-2GNP-0sa ve (b)-(d) AlCuMn-2GNP-4sa kompozitlerinin SEM görüntüleri ve EDS spektrumları.

Figure 8. SEM images and EDS spectrums of (a)-(c) AlCuMn-2GNP-0h and (b)-(d) AlCuMn-2GNP-4sa composites.

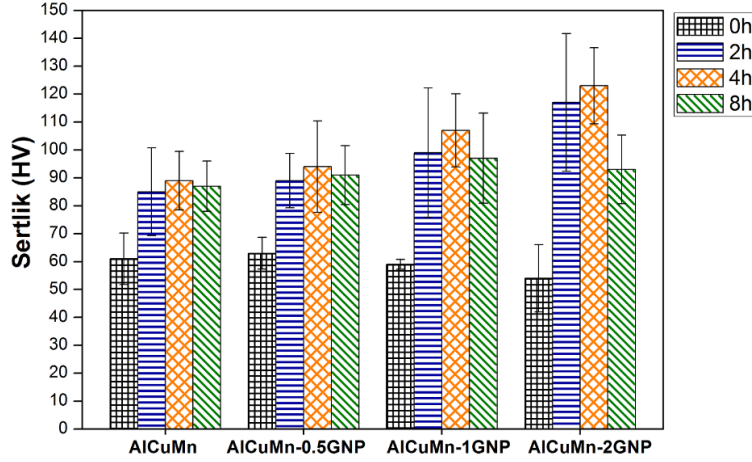
Çizelge 3. Şekil 8a ve b’de gösterilen noktaların EDS analizleri ile belirlenen bileşimleri.

Table 3. EDS compositional analyses results of the points in Fig. 8a and b.

Şekil 8a ve b’deki noktalar	Miktar (ağ. %)			
	Al	Cu	Mn	C
001	41,88	57,56	-	0,56
002	95,86	1,12	0,37	3,25
003	54,46	45,01	0,09	0,14
004	96,25	1,15	0,45	2,85
005	74,44	25,28	0,07	0,21

Şekil 9, Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin grafen miktarı ve öğütme süresine bağlı olarak sertliklerinin değişimini göstermektedir. Karışım halindeki tozlardan hazırlanmış numunelere göre mekanik alaşımlama ile üretilenlerin sertlik değerlerinin önemli oranda arttığı görülmektedir. Ayrıca, 4 saat mekanik alaşımlama uygulanmış ağ. % 0,5, 1 ve 2 GNP içeren kompozitlerin sertlik değerleri sırasıyla 94±16 HV; 107±13 HV ve 123±14 HV iken 8 saat mekanik alaşımlanmış numunelerin sertlikleri ise sırasıyla 91±11 HV, 97±16 HV ve 93±12 HV olarak ölçülmüştür. Buna göre, 4 saat mekanik alaşımlanmış tozlardan üretilen numunelerin sertlik değerleri artan grafen miktarı ile belli bir miktar artmıştır. Fakat 8 saat mekanik alaşımlanmış numunelerde grafen miktarına bağlı bu artış tam olarak belirgin değildir. Bu durumun, optimum süre üzerindeki öğütmelerde görülen partikül boyutu kabalaşması ve grafen plakaların topaklanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Alüminyum gibi sünek metallerin öğütülmesi sırasında soğuk kaynaklanma ve kopma arasındaki dengenin bozulması ile topaklanma oluşmasının önlenmesi için öğütme süresi gibi parametrelerin dikkatle kontrol edilmesi gerektiği bilinmektedir [Jones, 2001; Tekoğlu ve diğ., 2020]. Buna göre, mekanik alaşımlama için optimum süre 4 saat olarak belirlenmiş ve en yüksek sertlik değeri AlCuMn-2GNP-4sa numunesi için elde edilmiştir. Böylelikle, ağ. %2 grafen ilavesi ile AlCuMn-4sa alaşımının sertlik değeri 89 HV’den 123 HV’e ulaşmıştır. Mekanik alaşımlanan tozların artan öğütme süresi ile ortalama kristalit boyutlarının azaldığı ve örgü gerinimlerinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 5). Başlangıç tozlarının ortalama kristalit boyutları 4 saat MA sonrasında yaklaşık olarak 205 nm’den 66 nm’e düşmüştür. Buna göre, MA prosesinin tane incelmeye ve deformasyon sertleşmesi mekanizmaları ile sertlik artışına katkıda bulunduğu söylenebilir. İlave olarak, yığın yapıları ürünlerin XRD analizlerinde (Şekil 7) belirlenen Al₂Cu intermetalik fazı ve yapıya ilave edilen

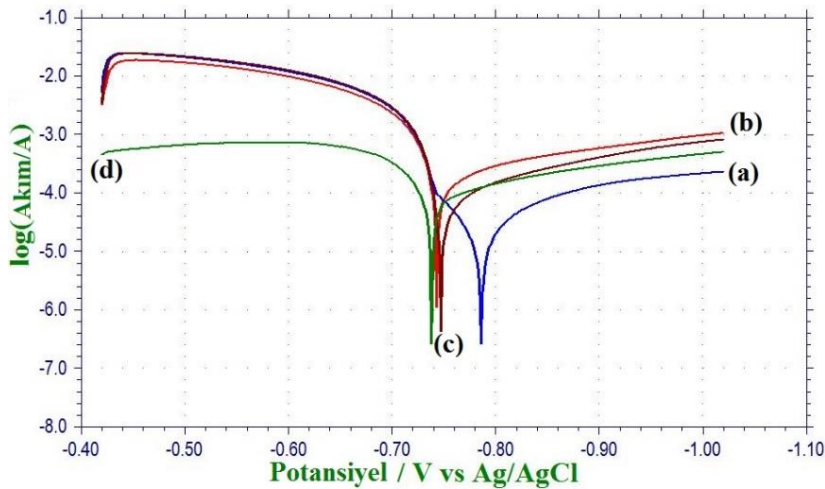
grafen partikülleri sırasıyla ikincil faz partikülleri ve Orowan mekanizması yoluyla sertlik artışı sağlamaktadır [Zhang ve diğ., 2018]. Ayrıca, yığın yapıli kompozitlerin SEM incelemelerinde (Şekil 8) gözlemlendiği gibi MA prosesi ile yapıda bulunan ikincil fazın (Al_2Cu) ve takviye malzemesinin homojen dağıtılması sağlanmıştır.



Şekil 9. Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin MA süresi ve GNP miktarına bağlı olarak mikrosertlik değerleri.

Figure 9. Microhardness values of the Al-5.5Cu-0.5Mn-xGNP composites according to the GNP amount and MA time.

4 saat mekanik alaşım uygulama uygulanmış Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin korozyon testi ile elde edilen Tafel Polarizasyon eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir. Çizelge 4, kompozitlerin korozyon akım yoğunluğu (I_{kor}), korozyon potansiyeli (E_{kor}) ve korozyon hızı değerlerini göstermektedir. Şekil 10 ve Çizelge 4'den grafen miktarındaki artışla birlikte genel olarak I_{kor} ve E_{kor} değerlerinin arttığı görülmektedir. Matris fazının korozyon hızı 12,9 mm/yıl iken artan grafen miktarı ile birlikte AlCuMn-2GNP-4sa numunesi için bu değer 85 mm/yıl'a çıkmıştır. Buna göre, grafen miktarındaki artışla birlikte kompozitlerin korozyon direnci azalmaktadır. Bu nedenle, grafen katkısının Al-5,5Cu-0,5Mn alaşımlarının korozyon direncini zayıflattığı söylenebilir. Ayrıca, literatürde Al yüzeyinde oluşan koruyucu Al_2O_3 tabakasının takviye partiküller tarafından kesintiye uğratılmasıyla korozyona açık zayıf noktaların oluştuğu ve grafenin çevresinde yer alan Al matrise göre katodik davranış sergilemesiyle alüminyumun korozyon direncini olumsuz etkilediği belirtilmiştir [Akçamlı ve diğ., 2019; Eisenhauer ve Gan, 2019; Latief ve diğ., 2011].



Şekil 10. AlCuMn-xGNP-4sa kompozitlerinin polarizasyon eğrileri (a) x: 0, (b) x: 0,5, (c) x: 1, (d) x: 2.

Figure 10. Polarization curves of the AlCuMn-xGNP-4h composites: (a) x: 0, (b) x: 0.5, (c) x: 1, and (d) 2.

Çizelge 4. AlCuMn-xGNP-4sa kompozitlerinin E_{kor} , I_{kor} ve korozyon hızı değerleri.

Table 4. E_{corr} , I_{corr} and corrosion rate values of the AlCuMn-xGNP-4h composites.

Numune	E_{kor} (V)	I_{kor} (A)	Korozyon Hızı (mm.yıl ⁻¹)
AlCuMn-4sa	-0,787	$2,489 \times 10^{-5}$	$0,0129.10^3$
AlCuMn-0,5GNP-4sa	-0,744	$2,258 \times 10^{-4}$	$0,118.10^3$
AlCuMn-1GNP-4sa	-0,748	$7,687 \times 10^{-5}$	$0,040.10^3$
AlCuMn-2GNP-4sa	-0,739	$1,614 \times 10^{-4}$	$0,085.10^3$

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada grafen nano plakalar ile takviye edilmiş Al-5,5Cu-0,5Mn matrisli kompozitler mekanik alışım ve basınçsız sinterleme kademelerinden oluşan bir toz metalurjisi prosesi ile üretilerek mekanik alışım süresi ve grafen miktarının mikroyapı, mekanik ve korozyon özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Artan mekanik alışım süresi ve GNP miktarı ile mekanik alışımlanmış tozların ortalama kristalit boyutu değerlerinin azaldığı görülmüştür. Karışım halindeki tozların ortalama kristalit boyutları yaklaşık 205 nm iken AlCuMn-2GNP-8sa tozlarında bu değer 38 nm'e düşmüştür.
- Yığın yapıları Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin mikroyapılarında Al₂Cu intermetalik fazı ile birlikte düşük oranda Al₄C₃ fazı tespit edilmiştir.
- Mekanik alışımlanmış Al-5,5Cu-0,5Mn-xGNP kompozitlerinin sertlik değerleri karışım halindeki numunelere göre oldukça artmıştır. Optimum öğütme süresi olarak belirlenen 4 saat mekanik alışımlanmış AlCuMn-4sa ve AlCuMn-2GNP-4sa numunelerinin sertlik değerleri sırasıyla 89 ve 123 HV olarak belirlenmiştir.
- Grafen takviyesi ile kompozitlerin korozyon dirençlerinin bir miktar azaldığı görülmüş ve matris fazının korozyon hızı 12,9 mm/yıl iken ağırlık %2 grafen içeren kompozit için bu değer 85 mm/yıl'a çıkmıştır.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 118M185 nolu proje ile desteklenmiştir. Ayrıca, sağladığı araştırma altyapısı ve imkanlarından dolayı Bursa Teknik Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı (BTÜ-MERLAB)'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)



- Akçamlı, N., Küçükelyas, B., Kaykılarlı, C., Uzunsoy, D., 2019, "Investigation of microstructural, mechanical and corrosion properties of graphene nanoplatelets reinforced Al matrix composites", *Mater Res Express*, Vol. 6, No. 11, pp. 115627.
- Bodunrin, M.O., Alaneme, K.K., Chown, L.H., 2015, "Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics", *J Mater Res Technol*, Vol. 4, No. 4, pp. 434-445.
- Davis, J.R., 1993, *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys (2. Basım)*, ASM International.
- Doel, T.J.A., Bowen, P., 1996, "Tensile properties of particulate-reinforced metal matrix composites", *Composites Part A*, Vol. 27, No. 8, pp.655-665.
- Edwards, R.S., Coleman, K.S., 2013, "Graphene synthesis: relationship to applications", *Nanoscale*, Vol. 5, No. 1, pp. 38-51.
- Eisenhauer E.M. and Gan Y.X., 2019, Corrosion behavior of a carbon network/aluminum matrix porous composite in salinated and acidic environments, *Chem Eng*, Vol. 3, No. 2, pp. 54.

- Tekoğlu, E., Ağaogulları, D. Öveçoğlu, M.L., 2020. Characterization investigations of the mechanically alloyed and sequentially milled Al-12.6 wt.% Si eutectic alloy powders, *Particul Sci Tech*, Vol. 38, No. 1, pp.15-22.
- Fogagnolo, J.B., Velasco, F., Robert, M.H., Torralba, J.M., 2003, "Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders", *Mater Sci Eng, A*, Vol. 342, No. 1-2, pp. 131-143.
- Hosseini, N., Abbasi, M. H., Karimzadeh, F., Enayati, M. H. 2009, "Structural evolution and grain growth kinetics during isothermal heat treatment of nanostructured Al6061", *Mater Sci Eng, A*, 525 (1-2), 107-111.
- Jafari, M., Enayati, M.H., Abbasi, M.H., Karimzadeh, F., 2009, "Thermal stability and structural changes during heat treatment of nanostructured Al2024 alloy", *J. Alloys Compd.*, Vol. 478, No.1-2, pp. 260-264.
- Jones, A.R., 2001, "Mechanical Alloying", *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Editör: Greg, P., Encyclopedia of materials: science and technology, Elsevier BV, 1-5.
- Kaczmar, J.W., Pietrzak, K., Włosiński, W., 2000, "The production and application of metal matrix composite materials", *J Mater Process Technol*, Vol. 106, No. 1-3, pp. 58-67.
- Kumar, A., Kumar, P., 2015, "A review on the mechanical properties, tribological behavior and the microstructural characterization of Aluminium metal matrix composites (AMMCs)", *Int J Sci Eng Res*, Vol. 6, No. 6, 1234-1245.
- Latief, F.H., Sherif, E.S.M., Almajid, A.A., Junaedi, H., 2011, "Fabrication of exfoliated graphite nanoplatelets-reinforced aluminum composites and evaluating their mechanical properties and corrosion behavior", *J Anal Appl Pyrolysis*, Vol. 92, No.2, pp. 485-492.
- Lawrance, C.A., Suresh Prabhu P., 2015, "Al 6061-TiB₂ metal matrix composite synthesized with different reaction holding times by in-situ method", *Int J Compos Mater*, Vol. 5, No. 5, pp. 97-101.
- Lyman T., 1973, *Metallography, structures and phase diagrams*, *Metals handbook*, Vol. 8, Metals Park, OH: American Society for Metals.
- Meng, F., Wang, Z., Zhao, Y., Zhang, D., Zhang, W., 2017, "Microstructures and properties evolution of Al-Cu-Mn alloy with addition of vanadium", *Metals*, Vol. 7, No. 1, pp. 10.
- Pérez-Bustamante, R., Pérez-Bustamante, F., Estrada-Guel, I., Santillán-Rodríguez, C.R., Matutes-Aquino, J.A., Herrera-Ramírez, J.M., Miki-Yoshida, M., Martínez-Sánchez, R., 2011, "Characterization of Al2024-CNTs composites produced by mechanical alloying", *Powder Technol*, Vol. 212, No. 3, pp. 390-396.
- Pérez-Bustamante, R., Pérez-Bustamante, F., Estrada-Guel, I., Licea-Jiménez, L., Miki-Yoshida, M., Martínez-Sánchez, R., 2013, "Effect of milling time and CNT concentration on hardness of CNT/Al2024 composites produced by mechanical alloying", *Mater Charact*, Vol. 75, pp. 13-19.
- Prashantha, H.G., Kumar, M., Xavior, A., 2014, "Graphene reinforced metal matrix composite (GRMMC): A Review", *Procedia Eng*, Vol. 97, 1033-1040.
- Rafiee, M.A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H.H., Yu, Z.Z., Koratkar, N., 2010, "Fracture and fatigue in graphene nanocomposites", *Small*, Vol. 6, No. 2, pp. 179-183.
- Saravanan, C., Subramanian, K., Ananda Krishnan, V., Sankara Narayanan, R., 2015, "Effect of particulate reinforced Aluminum metal matrix composite", *Mech Mech Eng*, Vol. 19, No. 1, 23-30.
- Suryanarayana, C. M., 2001, "Mechanical alloying and milling", *Prog Mater Sci*, Vol. 46, No. 1-2, pp. 1-184.
- Varol, T., Çanakçı, A., 2015, Microstructure, electrical conductivity and hardness of multilayer graphene/copper nanocomposites synthesized by flake powder metallurgy, *Met Mater Int*, Vol. 21, No. 4, 704-712.
- Woo, K. D., Zhang, D.L., 2004, "Fabrication of Al-7wt%Si-0.4wt%Mg/SiC nanocomposite powders and bulk nanocomposites by high energy ball milling and powder metallurgy", *Curr Appl Phys*, Vol. 4, No. 2-4, pp. 175-178.
- Yazdian, N., Karimzadeh, F., Tavoosi, M., 2014, "Fabrication and precipitation hardening characterization of nanostructure Al7075 alloy", *Indian J Eng Mater Sci*, Vol. 21, pp. 30-34.

- Zhang, W., Lin, B., Zhang, D., Li, Y., 2013, "Microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al-5.0 Cu-0.6 Mn alloys with different Fe content", *Mater Des (1980-2015)*, Vol. 52, No. 1993, pp. 225-233.
- Zhang, X., Li, S., Pan, B., Pan, D., Zhou, S., Yang, S., Jia, L. and Kondoh, K., 2018, "A novel strengthening effect of in-situ nano Al₂O₃w on CNTs reinforced aluminum matrix nanocomposites and the matched strengthening mechanisms", *J Alloys Compd*, Vol. 764, pp.279-288.
- Zhou, F., Lee, J., Lavernia, E.J., 2001, "Grain growth kinetics of a mechanically milled nanocrystalline Al", *Scr Mater*, Vol. 44, No. 8-9, pp. 2013-2017.



PROPERTIES OF MORTARS PRODUCED WITH CLASSLESS AFSIN-ELBISTAN FLY ASH AND WASTE GROUND GLASS

¹Hanifi BİNİCİ , ²Mustafa EKEN , ³Kenan USLU

¹Nişantaşı Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE
²Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Elbistan Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

³Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, TÜRKİYE

¹hanifibinici@gmail.com, ²mustafa.eken@istiklal.edu.tr, ³kenanuslu@hotmail.com

(Geliş/Received: 14.11.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.02.2021)

ABSTRACT: The aims of the present study to investigate classless Afsin-Elbistan fly. For this purpose, classless Afsin-Elbistan fly ash and waste granulated glass have been mixed at certain rates. After several experiments, obtained mixture according to standard were determined. The mortar samples produced by these mixtures with different percentages replaced of cement. Setting time, volume expansion, flexural and compressive strengths of samples were determined at 3-7-28 days. Moreover, alkali-silica reaction (ASR) of samples was tested according to using mortar bar experiments. The results of this study, Afsin-Elbistan fly ash can be used as C and F class ash in accordance. The bending and compressive strengths of the samples that added ten percent glass powder to the fly ash were found to be the highest. The expansion rates of the samples were found in accordance with the standard. The results obtained from experimental studies have shown that many properties of mortars produced with class ash are better than the Reference sample. The results of this study showed that by adding different amounts of glass powder to the Afsin-Elbistan fly ash, it could be used in cement production as the ash was classified into class.

Keywords: ASR; Fly ash; Strength; Ground Glass.

Sınıfsız Afsin-Elbistan Uçucu Külü ve Atık Cam Tozundan Yapılan Harçların Özellikleri

ÖZ: Bu çalışmanın amacı, sınıfsız Afsin-Elbistan uçucu külünün çimentoda katkı maddesi olarak kullanımı incelemektir. Bu amaçla, sınıfsız Afsin-Elbistan uçucu kül ve atık granül cam belirli oranlarda karıştırılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Birkaç denemeden sonra, söz konusu karışım sınıflı kül haline getirilmiştir. Elde edilen sınıflı kül farklı oranlarda kullanılarak standart harç numuneleri yapılmıştır. Numunelerin priz süresi, hacim genişlemesi, 3, 7 ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin alkali-silika reaksiyonu (ASR) harç çubuğu deneylerine göre test edilmiştir. Uçucu küle yüzde on cam tozu katılan numunelerin eğilme ve basınç dayanımların en yüksek bulunmuştur. Numunelerin genişleme oranları standarda uygun bulunmuştur. Numunelerin genişleme oranları standarda uygun bulunmuştur. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sınıflı külle üretilen harçların birçok özelliğinin Referans örnekten daha iyi olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Afsin-Elbistan uçucu küline değişik oranlarda cam tozu katılarak söz konusu kül sınıflı hale getirildiğinden çimento üretiminde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: ASR; Uçucu kül, Dayanım; Cam tozu.

1. INTRODUCTION

Pozzolana is defined as a siliceous or siliceous and aluminous material, which in itself possesses little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties. Natural and artificial pozzolanas have been used to obtain hydraulic binders for over a thousand years. Hardening of pozzolanic cement pastes can result from the reaction between pozzolana and the lime that is added to the mix as hydrated lime or is produced following hydration of Portland cement silicates. The pozzolanic reaction does not alter cement clinker hydration; it complements and integrates the hydration process because it results in a lower portlandite content and an increase in calcium silicate hydrates (Massaza, 1993; Turkmenoglu et al. 2000).

Besides reviewing the most recent investigations on pozzolana-containing cements, this paper shows that the behaviour of different types of pozzolana can be quite similar when they are blended and become hydrated along with Portland cement clinker. Portland cement properties may undergo several qualitative modifications the extent of which substantially depends on the pozzolana/clinker ratio. So, a maximum is reached in pozzolanic cements (Kaplan and Binici, 1996). The use of pozzolana has expanded because it has various advantages over other cementitious materials. They have a relatively constant chemical composition compared to pure Portland cement. Moreover, it has advantages like low heat of hydration, high sulphate and acid resistance better workability, higher ultimate strength, etc. These properties are beneficial to special applications such as hydroelectric dams, large bridges, power stations, metro systems, motorways, and harbours (Binici and Aksogan, 1996).

A number of artificial pozzolanas were investigated including Ground Granulated Blast furnace Slag, Fly Ash, Calcined Clay, Microsilica, Rice Husk Ash, Red Brick Dust, and Tile and Yellow Brick Dust etc. Fly ash is a very fine material produced by burning of pulverized coal in a thermal power plant. Fly ash is a general name used for the residual products of combustion that rise with flue gases. Fly ash, also known as flue ash, is one of the residues generated in combustion, and comprises the fine particles that rise with the flue gases. In an industrial context, fly ash usually refers to ash produced during combustion of coal. It is carried by the flue gas and is collected by the electrostatic precipitators or cyclones. Chemically and physically, fly ash can have many forms like C-fly ash and F-fly ash depending on the type of fuel burned and handling methods. A typical fly ash contains a significant amount of silicon dioxide and calcium oxide, which make it frictional and abrasive. Usually, fly ash has a fine particle size distribution less than 100 microns. Given the fine particle size, frictional nature and high temperature, fly ash can be a difficult material to handle reliably. Quantity does pose challenging problems, in the form of land usage, health hazards, and environmental dangers (Ghazali and Kaushal, 2015). A small portion of these amounts is used in the cement production and dam injections and brick production. However, fly ashes that are an industrial waste have many different and common usage areas in many countries (Kilincakale, 1995). The fly ashes whose production amounts have reached large measures in parallel with the energy needs have many potential usage areas such as in agriculture, in chemical industry, soil stabilization and in the production of various structural materials (Tokyay, 1994).

According to chemical test results, for $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (S + A + F) in ash A, S + F + A > 50% specified in ASTM C 618 class C and S + F + A > 70% in TS 639 could not meet the specified quality standards. Furthermore, the condition of maximum 1.0% for free lime in the TS EN 450 standard could not be achieved as it contained high volume of lime fly ash. The glow loss, MgO and Cl- contents remained within the limit values given in the standards. As a result, it has been observed that the Afsin-Elbistan Thermal Power Plant fly ash does not fully comply with the requirements of the relevant standards (Turker et al. 2009).

Exponentially increasing effects of industrial facilities, population growth, and technological developments cause environmental problems along with the necessity of disposal of accumulating industrial wastes like waste glasses. The annual amount of waste glass in our country is approximately 120,000 tons, which indicates the importance of utilizing this material in appropriate areas (Topcu and Canbaz, 2004; Turgut, 2007). Waste glasses in the industrial waste material group have an important share

in the classification due to the high silica value it contains. The amount of silica in waste glass powders reduces the amount of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, which is harmful and known as the undesired phase, and enables the formation of CSH gels known as useful phases that contribute to strength (Omran and Tagnit, 2016; Shao et al. 2000; Shi et al. 2005; Turgut, 2018). In addition, studies have shown that pozzolanic mineral additives reduce the void structure, improve permeability and reduce ASR expansions (Omran and Tangit, 2016; Park et al. 2004). In this study, Afsin-Elbistan ash, known as classless ash, is classified with waste glass powder additive and it is seen that the ASR expansion of the samples meet the boundary conditions specified in TS EN 196-3.

According to ASTM C 618, fly ashes are divided into two classes, namely F and C. The F class fly ashes are obtained as a result of burning anthracite coal and they are entitled as low ash lime since they include CaO less than 10 %. Since free lime has not been found in these ashes, they don't have self-hardening property. However, they gain hardening by reacting with lime in aqueous media. Pozzolanic reactions are very slow in normal conditions (Atis et al. 2002; Bentli et al. 2005; Sevim, 2003; Kockal and Ozturan, 2010). C class fly ashes are obtained as result of burning lignite coal. They are defined as high-lime fly ash because they keep more than 10% CaO in them. In accordance with ASTM C618'c, since the fly ash of Afsin-Elbistan Thermal Power Station is classless, it cannot be used in cement and concrete production. In the present study, this ash has been classified by using granulated glass at certain rates. Then, the cement produced by (AEFA-GG) with the class ash obtained, has been studied to find out if it could be used in the concrete production or not.

There are academic studies on the purpose of utilizing pozzolan and industrial wastes in cement production. Afsin - Elbistan thermal power plant is one of the power plants that has the highest energy generation capacity and the most fly ash in terms of ash amount in production. However, since the ashes produced do not have the limit values specified in ASTM C 618 and TS 639 standards, they are called non-class ash. Therefore, it is stated that these ashes cause environmental pollution and health threats by mixing with groundwater due to storage problems. This paper tries to explore the use of Afsin-Elbistan classless fly ash in cement and mortar production as C and F class ash with the addition of glass powder.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Material

The materials used in this study are Afsin-Elbistan Fly Ash (AEFA), CEM 1, Standard Rilem Sand and Tekirdag glass (GG). CEM 1, which was used as control cement, has been supplied from Kahramanmaras Cement Industry and Classless Fly Ash has been supplied from Afsin Elbistan Thermal Power Stations. The standard sand used had the size specified in TS 819.

2.2. Method

Fly ashes are classified differently according to their chemical content as specified in ASTM C618. Ashes that meet the requirement of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ in their chemical composition are called F class, and ashes that meet the condition of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$ are called C class ashes. Afsin-Elbistan Thermal Power Plant is one of the power plants in Turkey operating with a high capacity in terms of energy and fly ash production. When the chemical analysis of the ash samples taken from that plant were made, it was observed that the amount of lime in it was high. The amount of CaO and SO_3 , not meeting the requirements of the standards specified in ASTM C 618 it was considered to be classless ash. Since this waste material causes a storage and waste problem, it will be beneficial to evaluate it properly.

Turkey is one of the dependant countries on glass industry. As a result of increasing consumption together with the production, the problem of waste glass has increased to a great extent. Leaving glass, which is a fragile and sharp material, in the nature as a waste is very dangerous and harmful to health. The damage to be caused in the environment cannot be eliminated for long years. We have tried to combine the Afsin Elbistan fly ash (AEFA) and granulated glass (GG) in various ratios to make them SIL-

classified material. Glass is made of soil that has much silicium material (SiO₂). Its SiO rate being high, putting it in classless Afsin Elbistan Fly Ash at various rates, has made the latter class fly ash. The purpose of this study is to investigate the effect of mixing waste granulated glass at various proportions with fly ash, which is an artificial pozzolana, to make it classed. All the experiments applied in the research have been made based on the standards of certain developed countries and Turkish Standards. In these experiments normal consistency water rates were applied to the cement paste. Start and ending durations of the setting and volume expansion were determined in accordance with TS (TS EN 196-3, 2002) and the flexural and compressive strengths in accordance with TS (TS EN 196-1, 2002). The experimental studies have been carried out in Gaziantep University, Faculty of Engineering and Architecture concrete laboratory and Kahramanmaras Cement Industry, Physics and Concrete Laboratory. AEFA and GG combination percentages applied in this work are given in Table 1. The chemical, mineralogical and physical features of the materials used in the work are given in Table 2.

Table 1. Mix proportion

Sample number	Additives	
	AEFA	Granulated glass (GG)
Reference (R)	-	-
S ₁	95	5
S ₂	90	10
S ₃	85	15
S ₄	80	20
S ₅	70	30
S ₆	60	40
S ₇	50	50

Table
content of
AEFA-GG

2. Chemical
AEFA and
mixes

Samples	Componenet								Flay ash class	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	SO ₃	Na ₂ O	Loss ignigation	S+A+F	Class
AEFA	18.27	9.16	3.26	53.44	1.75	11.4	0.19	2.12	30.69	classless
S ₁	44.7	15.9	7.8	17.6	2.8	4.2	1.48		68.4	C
S ₂	46.6	15.2	7.3	16.5	2.9	4.3	2.26		69.1	C
S ₃	49.7	13.8	6.7	15.6	3.1	3.9	3.69		70.2	F
S ₄	52.2	13	6	15.2	3.3	3.6	4.70		71.2	F
S ₅	54.4	12.8	6.8	15.8	3.4	3.6	5.32		74.0	F
S ₆	55.7	10.8	5.2	14.5	3.4	2.9	6.58		71.7	F
S ₇	58.0	9.2	4.5	14.1	3.6	2.5	7.81		71.7	F
TS 639	F				<5	<5		<10	>70	
ASTM C 618	F					<5		<6	>70	
	C					<5		<6	>50	

2.2.1. Fineness

The kind of cement and features are one of the most important features affecting the concrete strength. The effect of cement features on the strength can be explained well by the speed of the process of hydration. If hydration develops very quickly, the strength of cement gets high values in a short time. The increase of the cement fineness causes increase of the specific area. The strength of binding agent increases when fineness increases and tendency to increase are seen in the 3, 7, 28, 90 and 180 day strengths of cement. The substituting rates instead of cement of the additives obtained by the mixtures of AEFA and GG are given in Table 3. Mortar samples have been produced by the new cement produced. Afsin-Elbistan fly ash and granulated glass mixture (AEFA –GG) have been mixed for 30 minutes in ball mill and the homogeneity of the cement has been provided.

Table 3. Mix proportion and Blaine values

Samples	Addition system and its ratio	Blaine (cm ² /g)
R	%100 CEM-I + 0 % AEFA-GG	4101
S ₁	%95 CEM-I + 5 % AEFA-GG	4490
S ₂	%90 CEM-I + 10 % AEFA-GG	4760
S ₃	%85 CEM-I + 15 % AEFA-GG	4764
S ₄	%80 CEM-I + 20 % AEFA-GG	4966
S ₅	%70 CEM-I + 30 % AEFA-GG	5144
S ₆	%60 CEM-I + 40 % AEFA-GG	5135
S ₇	%50 CEM-I + 50 % AEFA-GG	5057

2.2.2. Setting time and volume expansions

The setting time of the produced pastes and mortars has been determined in accordance with the standards. Le Chatelier (TS EN 196-3, 450-1, 459-2; TS EN ISO 9597) has been used for determining volume expansion.

2.2.3. The Production of mortar samples

Standard size prismatic moulds (40x40x160 mm) have been used. For mortar samples, classes Afsin-Elbistan fly ash and granulated glass (AEFA-GG), cement, sand and water ratios of mixtures are given in Table 4.

Table 4. Mortars mixtures (g)

Samples	Cement	AEFA-GG		Rilem sand	Water
R	450	0		1350	225
S ₁	427	22		1350	225
S ₂	405	45		1350	225
S ₃	382	67		1350	225
S ₄	360	90		1350	225
S ₅	315	135		1350	225
S ₆	270	180		1350	225
S ₇	225	225		1350	225

2.2.4. Alkali silica reaction test (ASR)

This test was applied according to ASTM C 1293. The ASR expansion was determined by accelerated mortar bar tests as per ASTM C 1260. For each mix, three 25 mm 25 mm 285 mm mortar bars were prepared. They were demolded 24 h after casting and placed in water at 800 C for the next 24 h. The initial lengths of the mortar bars were then recorded before they were immersed into 1 N 80 C NaOH solution for curing. The expanded lengths were subsequently measured after 14 days. The average values found for the three mortar bar specimens were reported as the ASR expansion. According to ASTM C 1260, expansion larger than 0.2% at 14 days is considered potentially deleterious while less than 0.1% is innocuous.

2.2.5. Flexural and compressive strength

Flexural and compressive strengths of the mortars at 3-7-28 days were tested according to TS EN 196-1.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Fineness

As it can be seen from Table 3, as long as the rate of AEFA-GG increases up to 30 %, the fineness value of the cement increased. This situation can be explained by particle size of granulated glass.

3.2. Setting Time

The setting durations of the mortar are given in Figure 1. Experimental results were found between limit values in the TS10156 standard. As the additive ratio increases, setting duration decreases. However, both the starting and ending period of the reference sample has been found lower than that of the others. Delaying of the starting and ending times of Afsin-Elbistan fly ash and glass powder mortar is the general character of pozzolans.

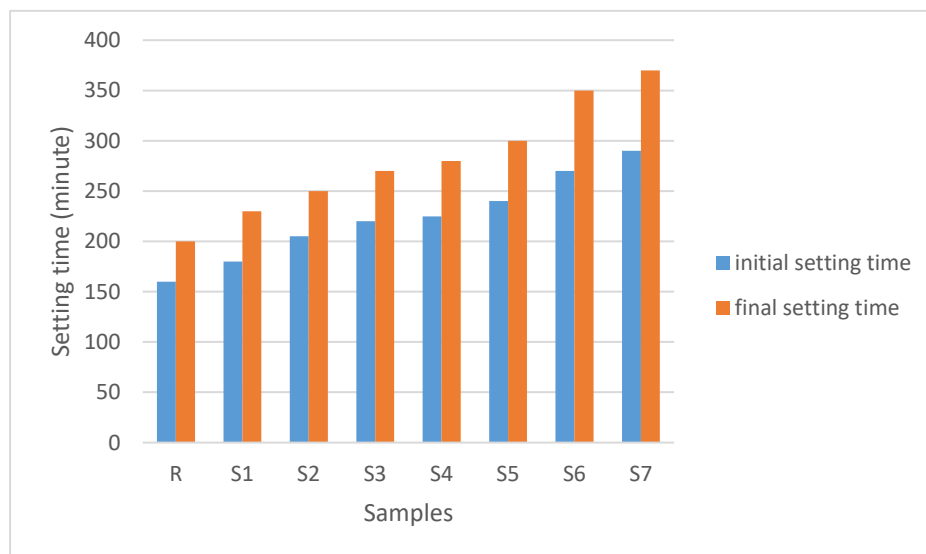


Figure 1. Setting time of samples.

3.3. Volume Expansions

The volume expansion of the pastes produced by AEFA–GG is given in Figure 2. None of the samples including the reference has shown any expansion above the limit value specified by the standards. This value is average around 1 mm. Crystal MgO and calcium sulphate are the main factors affecting the excessive expansion of the cement pastes. In this context, it has been seen that fly ashes used in the research have decreased the amounts of expansion of the cement pastes slightly. These results have shown that the mortars with Afsin-Elbistan fly ash and granulated glass will not bring about an expansion over the value by the standard requirements. Moreover, the volume expansion almost close to zero has been determined in S1 and S2 samples. It has been revealed that the values obtained fulfilled the requirements of TS EN 196-3.

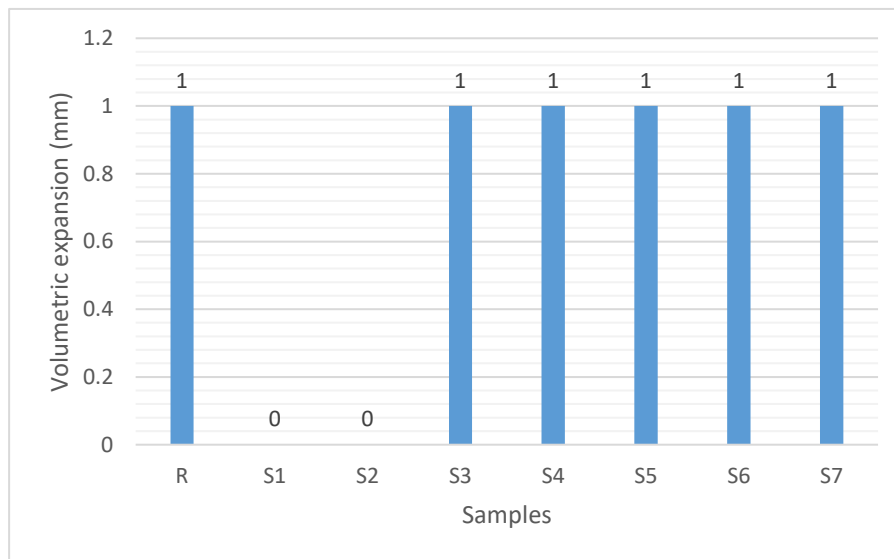


Figure 2. Volumetric expansion of samples.

3.4. Alkali Silica Reaction Test Results

Alkali-silica reaction (ASR) is one of the challenging problems related to the durability of concrete. During the process of ASR, various metastable forms of silicate phases in the reactive aggregates are dissolved by the alkaline pore solution of concrete and form the ASR gel. The alkali silica reaction test result of samples is given in Figure 2. Compared to the control sample, there was a reduction in the expansion of the mortars prepared with 5%–30% GG.

The reduction level of the mortars prepared with 5% GG was the highest, followed by that prepared with a 10% GG, and the least reduction level of 20% was found for the mortars prepared with 5% GG. The relative ineffectiveness of GG was consistent with the previous findings reported by Mukhopadhyay (Mukhopadhyay and Liu, 2015) and Zeidan (Zeidan and Said, 2016) who found that 0.5% and 3% GG were not effective to reduce the ASR expansion.

Test results showed that the ASR expansion increased with higher glass content, but this increase is within acceptable limits. Moreover, S1, S2, S3, S4 and S5 samples have shown lower ASR expansion than the reference, S6 and S7 samples. These results showed that 30% additive was the optimum amount. The mechanical values of all additive samples up to thirty percent were higher than the reference sample. Glass additive more than optimum ratio can cause alkaline silica reaction due to active silica. Hence, both the improvement of the mechanical properties and the contribution rate against the negative effects caused by the alkali aggregate reaction should be limited. Standard cement can be produced equally classless fly

ash and ground glass (optimum ratio 30%). The effect of replacing more than 40% cement by ground glass and classless fly ash on ASR expansion are also shown in Figure 3. The suppressing effect of ground glass and classless fly ash (5% - 30%) was relatively more prominent than others.

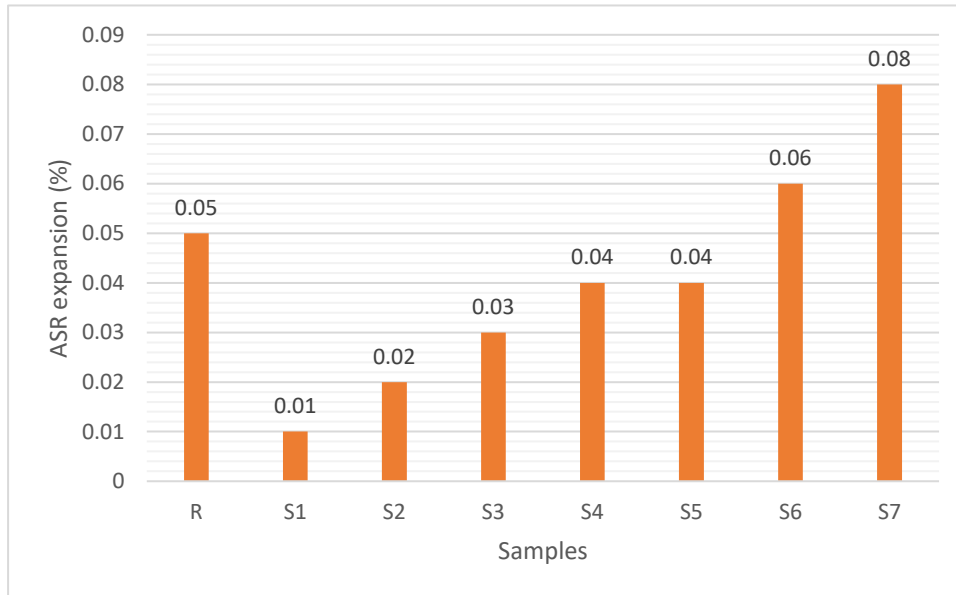


Figure 3. Alkali silica reaction test result of samples

The use of any supplementary cementitious material will depend on its performance, namely its strength, durability, and volumetric stability over time. In the case of waste glass, this performance is further challenged by the tendency for ASR to occur. The controlling process between a beneficial pozzolanic reaction, which would improve the performance of glass as an SCM, and a damaging ASR is the production of either a stable or swelling product. Depending on several factors, including calcium content, particle size, and alkalinity, the dissolved silica will repolymerize into expansive gel, hydrate into C-S-H, or a combination of both (Buchwad et al. 2003; Federico and Chidiac, 2009). The similarity between the ASR and pozzolanic reactions observed for waste glass in concrete suggests that they are closely related and may be simply various stages of one another subject to several controlling factors, including particle size, pore solution, and chemical composition. Furthermore, as the rate of waste glass additives in ash increased, the SO₃ ratio decreased. This was effective in all experimental results, especially ASR. However, at a replacement of more than 30 percent of GG, it primarily has a negative impact on ASR.

On the other hand, according to the TS EN 196, the total alkali oxides (Na₂O + K₂O) of the mixture to be used in cement production must be below 5.0%. In this study, the total alkali oxides (Na₂O + K₂O) in S5, S6 and S7 samples were found to be above 5.0%. As a result of the reaction of Silica + Alkali + Water, Alkali-Silica Gel is formed. The expansion caused by the gels emerging as a result of this reaction causes cracks in the concrete. In this respect, the ratio of GG should be limited to 30 percent.

3.5. Flexural Strengths of Samples

Flexural strengths of the mortars at 3, 7, and 28-days in accordance with the TS EN 196-1 are given in Figure 4, respectively. While the 3-day flexural strengths of the samples have increased up to the level of 15 %, then they have fallen substantially. The flexural strength of **S3** sample has been found higher than the reference sample. On the other hand, the flexural strength of sample **S7** has been found about 2,2 times higher than the reference sample.

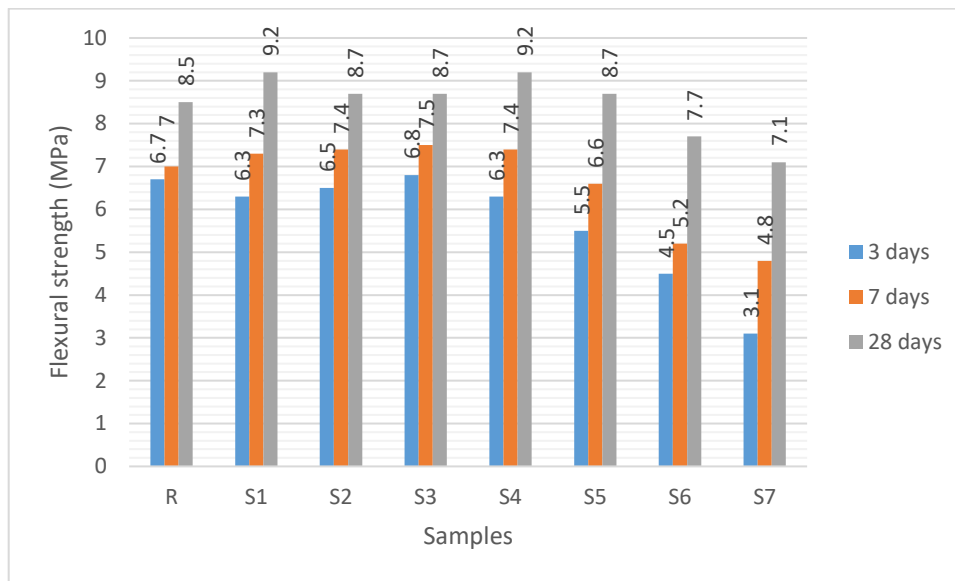


Figure 4. 3, 7 and 28-days flexural strength of the samples

While the 7 day-flexural strengths of the samples increase up to 20 % level of the mixture, then it has decreased. The flexural strengths of the samples with additives 5%, 10%, 15% and 20% AEFA-GG have been found higher than the reference sample. The flexural strength of **S3** has been found 9,3 % higher than the flexural strength of the reference sample. On the other hand, flexural strength of samples dropped with more than 20% by weight of AEFA-GG. The flexural strength of **S3** sample has been found 35 % higher than the flexural strength of the sample **S7**. The flexural strengths of the samples made with 5%, 10 %, 15%, and 20% and 30 % AEFA-GG have been found higher than the reference sample. The flexural strength of the samples made with AEFA-GG had the highest flexural strength in this group and had been found 9% higher than the reference sample. However, even the flexural strength of the sample made with 50% AEFA-GG has been found higher than the limit value of the standards. The optimum additive ratio from these results has been seen as 30%. Above this rate, decreasing of the flexural strengths somewhat can be explained by the micro structure of the glass. In case of adding more than the optimum additive rate, glass' bending strength has been found to be low since it is a brittle material.

3.6. Compressive Strengths of Samples

The compressive strengths of the samples at 3, 7 and 28-days are given in Figures 5, respectively. The 3-day flexural strengths of the samples made with 5 % AEFA-GG have been found higher than the reference sample. With higher ratio than this, compressive strength of the sample reduces significantly. 7-day compressive strength of the samples increased up to 20 % dope level, and then they have reduced. The compressive strengths of the samples made with 5%, 10%, 15% and 20% AEFA-GG have been found higher than the reference sample. The compressive strength of **S1** sample has been found 9 % higher than that of the reference sample. On the other hand, the compressive strength of this sample has been found 1,83 times higher than those of **S7** sample.

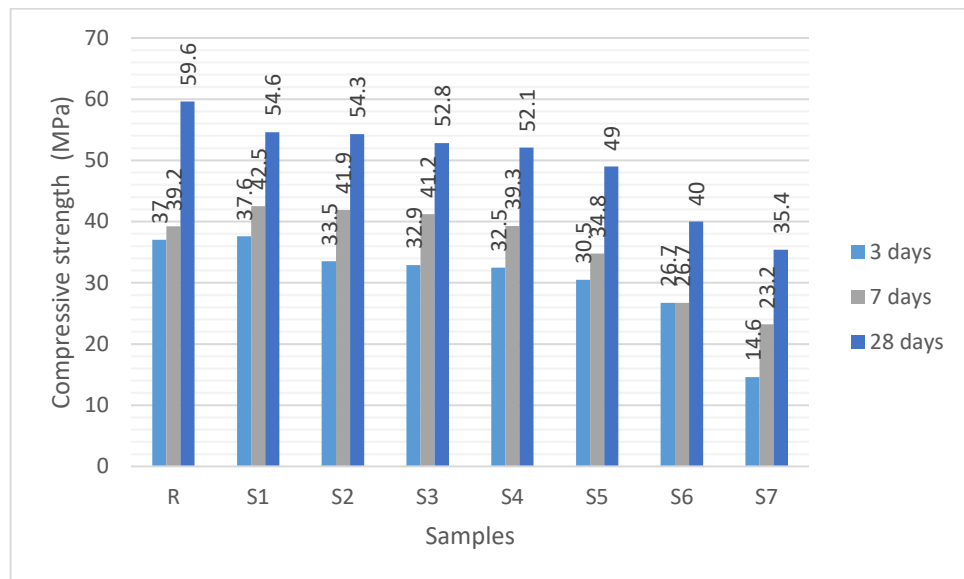


Figure 5. 3, 7 and 28-days Compressive strength of the samples

The compressive strengths obtained up to 30% made with AEFA-GG have been found higher than the requirements in the standards. From these results, the optimum additive rate has been seen as 30%. It is generally known to cause a reduction in the compressive strengths of the samples when over a certain contribution level of pozzolans is used. When flexure and compressive strengths with the optimal contribution of fly ash is roughly around 20%. The high values obtained as a result of the determined optimum mechanical effects can be explained by the fine-grained glass powder used to classify the fly ash. As a result of the addition of fine-grained glass powder to cement with fly ash, it has a high reactivity feature and provides a positive effect on the mechanical properties and a delaying effect on the progress of the cracks.

4. CONCLUSION

Overall results obtained in the study are listed below.

1. Flexural strength of samples made with 15% AEUA- GG at 3 and 7-day were found to be highest.
2. 28-day flexural strengths of the samples containing 20% AUFA-GG have been found the highest. This can be explained by the high pozzolanic feature of the additives.
3. 28-day compressive strengths of the samples containing 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50% AEFA-GG have been found higher than compressive strengths of reference samples. The 28-day compressive strengths of some samples have exceeded the 42,5 MPA values.
4. With an increase of additives, the starting and expiration setting time of mortars have increased.
5. Volume expansion has been found zero mm in the mixtures containing 5 % and 10% AEFA-GG, other samples have been found 1 mm.
6. By using AEFA-GG as supplementary cementitious materials, ASR expansion of mortars could be reduced to below acceptable limits, i.e., 0.1% at 14 days.
7. The incorporation of 5% GG and 10% GG in fly ash glass mortars can reduce the ASR expansion by different degrees. The mitigation effectiveness of 5% GG was lower than 10% GG.

Finally, the use of fly ashes providing both required strength, economic and environmental benefits together with granulated glass are an issue worth investigating. When classless Afsin-Elbistan fly ash is used at certain proportions with granulated glass, it can be brought back to economy as class fly ash.

REFERENCES

- ASTM C1293-08b, 2009, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali- Silica Reaction, ASTM Annual Book of Standards, Volume 04.02, Concrete and Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- Atis, C.D., Tartıcı, H., Sevim, U.K., Ozcan, F., Akcaozoglu, K., & Yuzgec, C., 2002, Afsin-Elbistan uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliği, 5. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, İstanbul, pp. 161-16 (In Turkish).
- Bentli, İ., Uyanık, A.O., Demir, U., Şahbaz, O., & Çelik, M.S., 2005, Seyit Ömer Termik Santrali Uçucu Küllerinin Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı. /MCET2005, İzmir, Türkiye, 09-12 Haziran, syf. 385-392(In Turkish).
- Buchwald, A., Kaps, C., & Hohmann, M., 2003, Alkali-activated binders and pozzolan cement binders- compete binder reaction or two sides of the same story? In: Proceedings of the 11th international congress on the chemistry of cement (ICCC), Durban, p. 1238-46.
- Binici, H., & Aksogan, O., 2006, Sulfate resistance of plain and blended cement, Cement and Concrete Composite 28 39-46.
- Federico, L.M., Chidiac, & S.E., 2009, Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods, Cement & Concrete Composites 31 606-610
- Ghazali, M., Kausha, O. P., 2015, Characteristics of Fly Ash from Thermal Power Plants and its Management along with Settling Pond Design, International Journal of Engineering Research & Science, vol.1, pp.24-32.
- Kaplan, H., & Binici, H., 1996, Trass and trass cement. Cem World 1:23-30
- Kılınckale, M. F., 1995, Uçucu Küllü Çimento Üretiminde Uçucu Külün Öğütme Şeklinin Çimento Üzerinde Etkisi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı, TMMOB yayını, 172 s, Ankara, (In Turkish).
- Kockal, N.U., & Ozturan, T., 2010, Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes, Journal of Hazardous Materials, vol. 179, pp. 954-965.
- Massazza, F., 1993, Pozzolanic cements, Cement and Concrete Composites 15 185-214
- Mukhopadhyay, K. A., & Liu, W. K., 2015, Application of nanotechnology to control ASR in Portland cement concrete, Nanotechnol. Constr. 465-471.
- Omran, A., & Tagnit-Hamou. A., 2016, Performance of glass-powder concrete in feld applications, Construction and Building Material 109 84-95.
- Park, B. S., Lee, C. B., & Kim, H. J., 2004, Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate, Cement and Concrete Research 34(12) (2004) 2181-2189.
- Sevim, U.K., 2003, Afsin-Elbistan Uçucu Külünün Beton ve Çimento Hamuru ve Harçlarının Üzerinde Yapılan Deneylerle Araştırılması, Doktora Tez Projesi, Proje No: FBE 2002 D 179, (In Turkish).
- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D., 2000, Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research 30 91-100.
- Shi, C., Wu, Y., Riefer, C., & Wang, H., 2005, Characteristics and Pozzolanic Reactivity of Glass Powders, Cement and Concrete Research 35 987-993.
- Tokyay, M., 1994, What is trass cement? What is not? TMMOB Chamber of Civil Engineers, 12-15 December, Ankara
- Topcu, I.B., & Canbaz M., 2004, "Properties of concrete containing waste glass". Cement Concrete Research, 34(1), 267-74,
- Turgut, P., 2007, "The use of limestone and glass powder in briquette production 7. National Concrete Congress, İstanbul, Turkey, 29 November-1 December
- Turgut, P., 2018, Block Production Using Fly Ash, Lime and Glass Powder, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences 24 (3) 413-418.
- Turku, P., Erdogan, B., Katnas, F., & Yeğinoğlu A., 2009, Classification In Turkey Properties Of Fly Ash, Cbt, Ankara

- Turkmenoglu, A., Tankut, A., Tokyay, M., & Turan C., 2000, Pozzolanic activities of natural additives from Ankara Region Turkey. Istanbul, Turkey, vol. 11, September p. 304–13.
- TS EN 196-3 2002, Cement Test Methods - Part.3: Setting time and expansion determination, Turkish Standards Institute, Ankara
- TS EN 450-1 2015, Fly Ash-Used in Concrete-Part 1: Definition, Properties and Compliance Criteria, Turkish Standards Institute, March, Ankara
- Zeidan, M., & Said, M. A., 2016, Effect of colloidal nano-silica on alkali–silica mitigation, J. Sustainable Cem. -Based Mater. 6 (2) 126–138.



TEK FREKANSLI GNSS ALICILARINDA KULLANILAN İYONOSFERİK ETKİ DÜZELTME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

¹Muzaffer KAHVECİ , ¹Damla ALİOĞLU , ²Güray ÇETİN 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

²Technische Universität, Berlin, ALMANYA

¹mkahveci@ktun.edu.tr, ²damlalioglu@hotmail.com, ³hrt.guray@gmail.com

(Geliş/Received: 29.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.02.2021)

ÖZ: Uydularla konum belirleme ve navigasyon (GNSS) uygulamalarında, Seçimli Doğruluk Erişimi (SA: Selective Availability) gibi kasıtlı bozular haricinde, en önemli hata kaynaklarından birisi iyonosferdir. İyonosferde atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonosferik etki, bu serbest elektronlar nedeniyle, uydu kod ölçülerinde gecikmeye, faz ölçülerinde ise hızlanmaya neden olmaktadır. Diğer taraftan iyonosferik etki frekans bağımlıdır. GNSS alıcılarının çok frekanslı olmasının en temel nedenlerinden birisi iyonosferik etkinin frekans bağımlı olması ve bu özellikten yararlanarak büyük oranda giderilebilmesidir. Ancak, tek frekanslı alıcılarda iyonosferik etkinin bu yöntemle giderilmesi olanağı bulunmamakta, bunun yerine navigasyon mesajları içerisinde yayınlanan iyonosferik model katsayıları kullanılarak giderilebilmektedir. Bu bağlamda, genelde gerçek zamanlı uygulamalar ve tek frekanslı alıcılar için örneğin GPS navigasyon mesajlarında Klobuchar iyonosfer modeli katsayıları da yayınlanmaktadır. Bu model ile iyonosferik etkinin yaklaşık %50'sinin giderilebilmesi olanaklıdır. Diğer taraftan, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından günümüz uydu sistemleri ve tek frekanslı alıcılar için önerilen NeQuick modeli kullanılarak da iyonosferik etkiler %70 oranında giderilebilmektedir. Bu çalışmada, Klobuchar ve NeQuick modellerine ilişkin algoritmalar kullanılarak iyonosferik etki hesapları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile söz konusu model algoritmalarının, zaman içerisinde Türkiye'de de üretilmesinin kaçınılmaz olduğuna inanılan yerli ve millî tek frekanslı GNSS alıcı yazılımlarında gerçek zamanlı mutlak konum belirleme amaçlı olarak kolaylıkla uyarlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, İyonosfer, Klobuchar, NeQuick, TEC

Comparison of Ionospheric Correction Models Applied in Single Frequency GNSS Receivers

ABSTRACT: Ionosphere is one of the most important error sources in GNSS positioning and navigation applications, except for deliberate disruptions such as Selective Availability. The number of free electrons detached from atoms in the ionosphere is large enough to change the propagation of electromagnetic waves. The ionospheric effect causes delay in GNSS code measurements (group delay) and acceleration in phase measurements (phase advance) due to these free electrons. One of the main reasons why GNSS receivers are multi-frequency is that the ionospheric effect is frequency dependent and can be largely eliminated by taking advantage of this feature. However, it is not possible to eliminate the ionospheric effect in single frequency receivers with multi-frequency method, instead it can be eliminated by using the ionospheric model coefficients broadcast in the navigation messages. In this context, Klobuchar ionosphere model coefficients are also broadcast for real-time applications and single frequency receivers, for example in GPS navigation messages. With this model, it is possible to eliminate approximately 50%

of the ionospheric effect. On the other hand, ionospheric effects can be eliminated by 70% using the NeQuick model recommended by International Telecommunication Union (ITU) for today's satellite systems and single frequency receivers. In this study, Ionospheric effect computations were performed using Klobuchar and NeQuick algorithms and the obtained results were compared. With this research, it has been concluded that both algorithms can be adapted in any "local and national" GNSS receiver firmware to be manufactured in future in Turkey.

Key Words: GNSS, Ionosphere, Klobuchar, NeQuick, TEC

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uydularla konum belirlemede (GNSS) ile konum belirleme ve navigasyon uygulamalarında, elde edilen konum doğruluklarını etkileyen çok sayıda hata kaynağı vardır. Bunlar çok genel olarak; atmosferik ve çevresel ortama, cihaza, ölçü yöntemine ve uduya bağlı hatalar şeklinde sınıflandırılabilir. Bu hata kaynaklarından atmosferden kaynaklanan hatalar iyonosferik ve troposferik hatalar olarak ifade edilebilir (Kahveci ve Yıldız 2018). Ölçü ve hesap sonuçlarını olumsuz etkileyen bu hata kaynaklarının neden oldukları hataların çoğu ölçü yöntemi veya modelleme ile büyük oranda giderilebilmektedirler. Uydudan gelen sinyaller atmosferin farklı katmanlarından geçerek alıcıya ulaşmaktadır. Sinyal bu yolculuk boyunca iyonosfer ve troposfer tabakalarından geçmekte ve bu tabakalardan geçtiğinde farklı etkilere maruz kalmaktadır.

Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık olarak 8 km, ekvatorunda 18 km'dir. Troposfer tabakası dağıtıcı bir özelliğe sahip olmadığı için troposferik etki uydu sinyali frekansına bağımlı değildir. Bu nedenle, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkisi aynı büyüklüktedir ve GNSS alıcılarının ikili (çoklu) frekans özelliğinden yararlanarak giderilmesi olanaklı değildir (Kahveci 1997).

İyonosfer, atmosferin Güneş ışınımı sonucu iyonize olmuş, yüksek yoğunlukta serbest elektron içeren, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaşmış halde bulunduğu ve elektrik iletkenliği kazandığı, elektromanyetik dalgaları yansıtacak miktarda iyonların ve serbest elektronların bulunduğu yeryüzünden yaklaşık 50 km ile 1000 km arasında yükseklikte bulunan atmosferik tabakadır (Klobuchar 1987, Klobuchar ve Doherty 1990). İyonosferin güneşe göre olan konumu zamanla değiştiğinden iyonlaşma miktarı da zamana göre değişmektedir. Gündüzleri güneş ışınları ile atomlar ve moleküller elektron ve iyonlara ayrılırlar, dolayısıyla gündüzleri serbest elektron miktarı daha fazladır. Güneş lekeleri sayısı (Sun Spot Number) ve güneş patlamaları, güneş ışınım seviyesini dolayısıyla iyonlaşmayı ve iyonosferdeki serbest elektron miktarını önemli ölçüde etkiler (URL1). İyonosferdeki bu serbest elektronlar ise radyo dalgalarının yayılımını etkilemektedir. İyonosfer tabakasında bulunan serbest elektronlar ve iyonlar iyonosfer tabakasında dağıtıcı bir ortam özelliği oluşturmaktadır. Bir ortamın kırıcılığı, içinden geçen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı ise ortamın dağıtıcı olduğundan söz edilebilir. Dolayısıyla, iyonosferik etkinin büyüklüğü uydu sinyali frekansına, zamana, konuma, mevsime ve güneş radyasyon hareketlerine bağlı olarak değişim gösterir. Başka bir ifadeyle, iyonosfer tabakası troposfer tabakasının aksine farklı frekanslarda farklı farklı etkiye neden olmakta ve bu nedenle sinyaller GPS uydularından iki farklı taşıyıcı frekans (L1 ve L2) üzerinden yayınlanmaktadır. Boşlukta kod ve faz, ışık hızında yayılırlar (Klobuchar ve Doherty 1990). Ancak, iyonosferdeki serbest elektronlar, taşıyıcı dalganın faz hızını artırır, kod hızını ise geciktirir. İyonosferik etki kod ve faz sinyalleri için aynı büyüklüğe ve ancak ters işaretlere sahiptirler. Sonuç olarak görelî veya diferansiyel GNSS yöntemi ile konum belirlemede alıcıların çok frekanslı olması özelliği nedeniyle özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda iyonosferik etki büyük oranda giderilmektedir. Ancak, tek frekanslı alıcılar için böyle bir çözüm olanaklı değildir. Özellikle L bandında navigasyon amaçlı kullanılan kod ölçülerine bu düzeltme getirilmezse örneğin GPS L1 bandında (1575.42 MHz) düşük yükseklik açılarında ve yüksek iyonlaşma zamanlarında 50 metreye varan uydu-alıcı uzaklığı hataları söz konusu olacaktır (Bidaine vd. 2006).

Bu çalışmada, tek frekanslı alıcılarda yapılan GNSS ölçülerindeki iyonosferik etkinin en aza indirilebilmesi için GPS ve Galileo uydu navigasyon mesajlarında katsayılar şeklinde yayınlanan Klobuchar ve NeQuick iyonosferik modelleri incelenerek, buna ilişkin iyonosferik etki hesabı yazılımı hazırlanmış olup, bu yazılımla elde edilmiş olan hesaplama sonuçları tartışılmaktadır.

GNSS İLE KONUM BELİRLEMEDE İYONOSFERİK ETKİ (IONOSPHERIC EFFECT ON GNSS POSITIONING)

Uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca olan toplam elektron miktarı, TEC (Total Electron Content) olarak ifade edilmektedir. TEC, uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca alınacak (düşey ya da eğik) bir kesitteki 1 m²'deki toplam elektron sayısı olarak da ifade edilebilir. Uygulamada ise bu büyüklük TECU ile ifade edilir ve 1 TECU=10¹⁶ elektron/m² olarak kabul edilir (L1 sinyali için 1 TECU = 0.16 metrelik gecikmeye karşılık gelmektedir). TEC, genel olarak, yerel zamanla yaklaşık 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır. Buradan iyonosferin, elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir. Gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Yeryüzü manyetik ekvatoru civarında gece süresince ortalama iyonosferik etki 10 nanosaniye (~3m), gündüz ise 50 nanosaniye (~15m) kadardır (Klobuchar ve Doherty 1990). Ancak, Türkiye'nin de yer aldığı orta enlem kuşaklarında gündüz süresince oluşan TEC miktarı ve dolayısıyla etkisi manyetik ekvatora göre daha azdır. Bunun dışında gözlenen uydunun yükseklik açısının da iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır (Hoffmann vd. 2008). GNSS alıcısının zenitindeki iyonosfer, sadece bu doğrultudaki uydu-alıcı sinyal yolu için önemlidir. Oysa, GNSS ölçüleri farklı yükseklik açıları ve azimutlarda yapılmaktadır. Bu da GNSS sinyallerinin iyonosferin farklı bölgelerinden eğik yol izleyerek geldiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, iyonosfer tabakasındaki iyonlaşma ve serbest elektronlardan kaynaklanan bu hata uydu ve alıcı arasındaki olması gereken (gerçek) geometrik uzunluk ile ölçülen mesafe arasında fark meydana getirmektedir ve bu farkın hesaplanarak ölçülmüş olan uydu-alıcı uzaklığına düzeltme olarak getirilmesi gerekmektedir. Bu fark (iyonosferik etki), (1) eşitliği hesaplanabilmektedir (EC 2016, Klobuchar 1987, Di Giovanni vd. 1990).

$$\Delta\rho_{R(Li)}^s = \Delta_{iono} = \pm 40.3 \frac{STEC}{f^2(Li)} \quad (1)$$

Burada;

Δ_{iono} = ölçülen ve gerçek geometrik uzunluk arasındaki fark olup birimi metredir.

$STEC$ = uydu-alıcı arasında oluşturulan eğik kesitte 1 m²'deki toplam elektron sayısı (TEC)

$f^2(Li)$ = sinyal frekansı (L1 veya L2) olup, Hz biriminde ifade edilmektedir.

(1) eşitliğinden görüleceği gibi iyonosferik gecikme etkisi TEC ile doğru orantılı olup sinyal frekansı ile ters orantılıdır. Buradan da farklı frekanstaki sinyallerin maruz kalacağı iyonosferik etki büyüklüğünün de farklı olacağı sonucuna varılabilir (Kahveci, 1997). Bu nedenle, iyonosferik etkinin büyük oranda giderilmesindeki en etkin yöntem çok frekanslı GNSS alıcılarının kullanılması olmaktadır.

Çok frekanslı GNSS alıcıları ile iyonosferik etki büyük ölçüde giderilmesine karşın tek frekanslı alıcılar için bu olanaklı değildir. Çok frekanslı alıcıların tek frekanslı alıcılara göre daha pahalı olmasından dolayı birçok uygulamada tek frekanslı alıcılar kullanılmaktadır. Tek frekanslı alıcıların kullanılması durumunda ise iyonosferik etkinin giderilmesi için bazı iyonosferik modeller kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, özellikle gerçek zamanlı uygulamalar için uydu navigasyon mesajında yayınlanan iyonosferik model (GPS için Klobuchar modeli) katsayıları ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) kullanılarak düzeltme getirilmektedir. Bunlardan α katsayıları düşey yöndeki gecikmenin genliğini, β katsayıları ise modelin periyodunu ifade eden kübik fonksiyon katsayılarıdır. Bir yıl 37 alt zaman dilimine ayrılmış olup, bu katsayılar her bir alt zaman dilimine önceden GPS Ana Kontrol İstasyonu tarafından yüklenmekte ve bu değerler 6 günde bir güncellenmektedir (IS-GPS-200K 2019). Bu katsayıların kullanılması ile özellikle orta enlemlerde iyonosferik etkinin yaklaşık %50'si giderebilmektedir (, Klobuchar ve Doherty 1990, Komjathy 1997, Ciećko ve Grunwald 2020).

Tek frekanslı GPS alıcılarında iyonosferik etkinin giderilmesi için kullanılan model 1986 yılında John A. Klobuchar tarafından geliştirilen Klobuchar iyonosferik modelidir (Klobuchar 1987). Klobuchar modeli deneysel bir modeldir. Klobuchar algoritmasında ölçü bölgesindeki iyonosfer 8 katsayı ile tanımlanmakta olup (Çizelge 1’de ION ALPHA ve ION BETA katsayıları), bu model iki boyutlu “ince tek tabaka” modeli ile gösterilmektedir (Şekil 1). Bu modelde, düşey yöndeki TEC (VTEC: Vertical TEC) değerlerinin belirli bir yükseklikteki (H=350-450 km) iki boyutlu bir kesit içerisinde olduğu, uydu sinyalinin iyonosfer tabakasını (single layer) deldiği noktadaki (IPP: Ionospheric Pierce Point) zenit açısına (z’) bağlı olarak hesaplanan eğik TEC (STEC: Slant TEC) ile VTEC arasındaki dönüşüm ise (2) eşitliğindeki indirgeme oranı ile hesaplanabilmektedir (Sacher 1999, Jin vd. 2012, Wolfgang vd. 2013, Prieto-Cerdeira vd. 2014,). Şekil 1’de, SIP, alt-iyonosfer noktasını ifade etmektedir.

$$\text{STEC} = M(E) \cdot \text{VTEC}$$

$$M(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R \cdot \cos E}{R+H}\right)^2}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

E= sinyal yükseklik açısını (E=90-z)

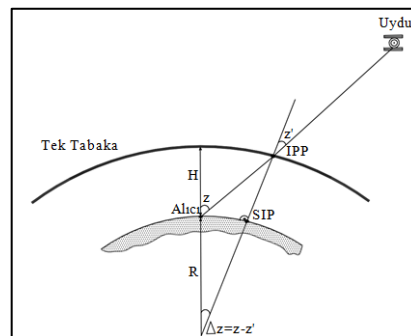
H= tek tabaka iyonosfer katmanı (F2) yüksekliğini (350-450km)

R=6371 km (yeryüzünün yarıçapı) ifade etmektedir.

Çizelge 1. GPS yayın (Broadcast) efemerisi mesajı içeriği

Table 1. Content of GPS Broadcast Ephemerides

2.10	N: GPS NAV DATA	RINEX
VERSION / TYPE		
teqc 2010Mar17		20110102 00:00:49UTC PGM /
RUN BY / DATE		
MSXP IAX86-PII bcc32 5.0 MSWin95->XP 486/DX+		COMMENT
GPSBase 2.61 3086		COMMENT
7.4506D-09 -1.4901D-08 -5.9605D-08 1.1921D-07		ION ALPHA
9.2160D+04 -1.1469D+05 -1.3107D+05 7.2090D+05		ION BETA
-3.725290298462D-09-1.332267629550D-14 61440 1617 DELTA-UTC:		
A0,A1,T,W		
		END OF HEADER



Şekil 1. Tek tabaka iyonosfer modeli

Figure 1. Single Layer Iono Model

Sonuç olarak, Klobuchar modelinde GPS L1 frekansındaki eğik kesit TEC (STEC) değerleri, sinyalin iyonosfer tabakasını deldiği noktadaki (IPP) düşey kesit TEC (VTEC) değerlerinden yararlanarak hesaplanmakta ve hesaplanan bu VTEC değeri, (2) eşitliğindeki indirgeme faktörü ile çarpılarak elde edilmektedir. Bu modelde, jeomanyetik enleme ve yerel zamana bağlı olarak iyonosferin günlük

değişimleri modellenmektedir. Bu nedenle, Klobuchar modelinde gündüz ve gece için ayrı hesaplamalar yapılmaktadır. Örneğin L1 frekansında yapılan gece ölçülerine tüm dünya için geçerli 5 nanosaniyelik (~1.5 m) sabit bir düzeltme öngörülmektedir. Dolayısıyla, yeryüzünde herhangi bir noktadaki etkiyi hesaplamak için GPS navigasyon mesajında yayınlanan 8 katsayı kullanılmaktadır. GPS Yer Kontrol Bölümünde, bu 8 katsayı mevsime ve güneş radyasyon hareketlerine bağlı olarak hesaplanmakta ve sürekli güncellenmektedir.

Galileo uyduları da kullanıcılarına, GPS uydularında olduğu gibi, çift (çok) frekanslı ve tek frekanslı hizmet sağlamaktadır. Galileo tek frekanslı alıcı için de iyonosferik etki algoritması kullanılmakta olup, bu algoritma "NeQuick Elektron Yoğunluk" modeline dayanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, NeQuick modeli ile Galileo alıcısının bulunduğu coğrafi koordinatlara, zamana (UT) ve iyonosfer tabakası yüksekliğine bağlı olarak, uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca sayısal integral ile elektron yoğunluğu (TEC) hesabı yapılmaktadır. Bu model, güneş radyasyon aktivitesi değerlerine (sun spot number veya solar radio flux) bağlı olarak sonuç vermektedir (Bidaine vd. 2006, EC 2016,). NeQuick modelinin ilk versiyonu, TEC hesabında kullanılmak üzere Uluslararası Telekomünikasyon Birimi (ITU-R) tarafından önerilmiş olup, günümüzde ise aynı kurum tarafından NeQuick2 versiyonunun kullanılması önerilmektedir (ITU-R 2019). NeQuick modeli ilk olarak (Di Giovanni ve Radicella, 1990) tarafından yapılmış analitik elektron yoğunluğu hesabı "DGR (Di Giovanni Radicella)" modeline dayanılarak oluşturulmuştur. ITU-R tarafından önerilen NeQuick modeli Galileo uydu sistemini kullanan tek frekanslı alıcıların iyonosferik düzeltmeleri için adapte edilmiş olup, "NeQuick_G" olarak isimlendirilmiştir. Bu model, Galileo uydularına ait navigasyon mesajı içerisinde 3 katsayı (a_0 , a_1 , a_2) ile verilmektedir.

"NeQuick_G" modelinde güneş radyasyon hareketliliği Galileo sistemi kontrol ve işletim merkezi tarafından tüm dünya için günlük (24 saat) hesaplanan etkin iyonlaşma seviyesi (Az) ile tanımlanmaktadır. Böylece, model kullanılırken ölçü anı için en iyi iyonlaşma seviyesi tanımlanmış olmaktadır. (EC 2016)'da Az , (3) eşitlikleri ile verilmektedir:

$$Az = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2 \quad (3a)$$

$$\tan(\mu) = \frac{I}{\sqrt{\cos\phi}} \quad (3b)$$

$$\tan I = 2 \cdot \tan\phi_m \quad (3c)$$

Burada (a_0 , a_1 , a_2), Galileo navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan üç iyonosferik katsayıyı ifade etmekte olup, μ ise gözlemcinin jeodezik enlemine ($\cos\phi$) karşılık gelen manyetik alan eğim açısı (I) ile hesaplanan çift kutuplu manyetik alandaki enlem değeridir (μ ifadesi MODIP enlemi olarak da isimlendirilmektedir). μ , derece biriminde ifade edilmekte olup, NeQuick_G modeli içerisinde her bir coğrafi koordinat için karşılık gelen değerleri tablo halinde mevcuttur (EC 2016). Manyetik alan eğim açısı (I: GNSS alıcısı konumunun yatay düzlemi ile manyetik alan doğrultusu arasındaki açı) ise (3c) eşitliği ile genel olarak hesaplanabilir. (3c) eşitliğinde, ϕ_m , yer manyetik alanının iki kutuplu olduğu yaklaşıma göre hesaplanmış jeomanyetik enlemi ifade etmektedir (Bidaine vd. 2006). Burada; a_0 , a_1 ve a_2 katsayıları günlük olarak güncellenmekte ve kullanıcılara sunulmaktadır (Çizelge 2).

NeQuick_G algoritması, Klobuchar modeline göre biraz daha karmaşık olup, tek frekanslı alıcılarda gerçek zamanlı kullanım için kurulması da bazı verilerin (CCIR: Comité Consultatif International des Radio communications) haritalarının ve enlem grid dosyasının önceden hazır olması gerekliliği nedeniyle, zahmetli olmaktadır. NeQuick_G modeli ile kod ölçülerindeki iyonosferik etkinin %70 oranında giderilebildiği birçok araştırmada yayınlanmıştır (Bidaine vd. 2006, Piriz vd. 2016).

Çizelge 2. Galileo navigasyon mesajındaki (a_0, a_1, a_2) katsayılarıTable 2. (a_0, a_1, a_2) coefficients in Galileo navigation message

```

-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
      3.03          N: GNSS NAV DATA      E: GALILEO NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
NetR9 5.01      Receiver Operator      20150619 000000 UTC PGM / RUN BY / DATE
GAL      .1248D+03      .5039D+00      .2377D-01      .0000D+00      IONOSPHERIC CORR
GAUT      .3725290298D-08      .532907052D-14      345600 1849      TIME SYSTEM CORR
      16      17      1851      3      LEAP SECONDS
      END OF HEADER
E12 2015 06 19 02 10 00      -.138392508961D-02      -.131464616970D-09      .000000000000D+00
      .930000000000D+02      -.165531250000D+03      .285797618904D-08      .138275888459D+01
      -.782497227192D-05      .346679124050D-03      .114385038614D-04      .544062509727D+04
      .439800000000D+06      .298023223877D-07      -.296185101312D+01      -.111758708954D-07
      .965683294025D+00      .993750000000D+02      -.629360976005D+00      -.541593988135D-08
      -.571452374714D-11      .516000000000D+03      .184900000000D+04
      .312000000000D+01      .000000000000D+00      -.651925802231D-08      -.605359673500D-08
      .440734000000D+06

```

NeQuick_G yazılımının girdi parametreleri; gözlem noktasının üç boyutlu jeodezik koordinatları (enlem, boylam, yükseklik), gözlem tarihi (UT olarak gün, ay, yıl), güneş enerjisi hareketliliğinin seviyesini gösteren, 10.7 cm (F10.7) dalga boyundaki güneş radyasyon akısı (veya güneş lekesi sayısı) aylık ortalama değeridir (EC 2016). Bu başlangıç değerleri ve CCIR haritaları (CCIRxx.asc) kullanılarak diğer parametreler hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda, kullanıcının tercihine bağlı olarak güneş radyasyon akısı yıllık ortalaması da (R_{12}) kullanılabilir.

PROGRAM ALGORİTMALARI (ALGORITHMS)

Klobuchar Algoritması (Klobuchar Algorithm)

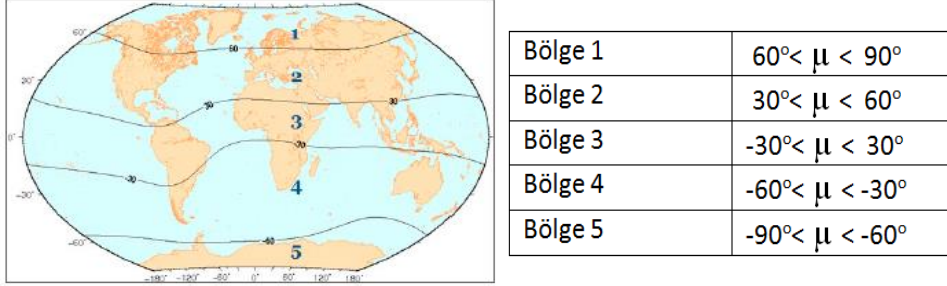
Tek frekanslı GPS alıcıları içerisinde kullanılmakta olan Klobuchar Algoritması; alıcı koordinatları, sinyal yükseklik açısı, gözlem yapılan uydunun azimutu ile α_n ve β_n katsayıları biliniyorsa (bu bilgiler GPS navigasyon mesajı içerisinde yayın efemerisi bilgileri olarak mevcuttur), (Klobuchar 1987)'de verilen hesaplama adımları takip edilerek çözümlenmektedir. Klobuchar modeli ile IPP (Ionosphere Pierce Point) noktasının jeomanyetik enlemine bağlı ve geceye ilişkin VTEC değeri olarak hesaplanmaktadır (Klobuchar 1987). Konya Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümünde yürütülen lisansüstü tez çalışması kapsamında Klobuchar algoritmasına dayalı Matlab tabanlı bir yazılım hazırlanmış ve makalenin sayısal uygulamasında kullanılmıştır.

NeQuick_G Algoritması (NeQuick_G Algorithm)

Daha önce de ifade edilmiş olduğu gibi NeQuick_G modeli, Galileo tek frekanslı uydu sinyallerinin gerçek zamanlı iyonosferik düzeltmelerini hesaplamak amacıyla NeQuick2 modelinden uyarlanmıştır. NeQuick modeli; zaman bağımlı üç boyutlu elektron yoğunluk hesaplama modeli olup, DGR profil modeline dayanmaktadır (Di Giovanni ve Radicella 1990). NeQuick_G modeli ile tek frekanslı Galileo alıcıları için uydu-alıcı uzaklığına getirilecek iyonosferik etki düzeltme modeli algoritması çok genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (OS SIS ICD 2006):

a. Etkin iyonlaşma seviyesi, A_z , navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan üç iyonosferik katsayıdan (a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}) (3) eşitliği ile hesaplanır (OS SIS ICD 2006, Aragon-Angel vd. 2006). A_z , 0 ile 400 arasında bir değer almaktadır (EC 2006). NeQuick modelinde, gözlem noktasının jeomanyetik enlemi, önceden hazırlanmış olan ($5^\circ \times 10^\circ$) grid dosyasından (Galileo için modip_9.asc) IGRF (International Geomagnetic Reference Field) modeli kullanılarak 3ncü dereceden Lagrange enterpolasyonu ile hesaplanmaktadır (URL2).

İyonosferik etkinin genel özelliklerine ve büyüklüğüne bağlı olarak yer manyetik alanına bağlı olarak Dünya için 5 μ (MODIP) bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 2). Bu tanımlara göre Türkiye 2nci bölgede ($30^\circ < \mu < 60^\circ$) yer almaktadır.



Şekil 2. Farklı iyonosferik özelliklere sahip μ (MODIP) bölgeleri (EC 2016)

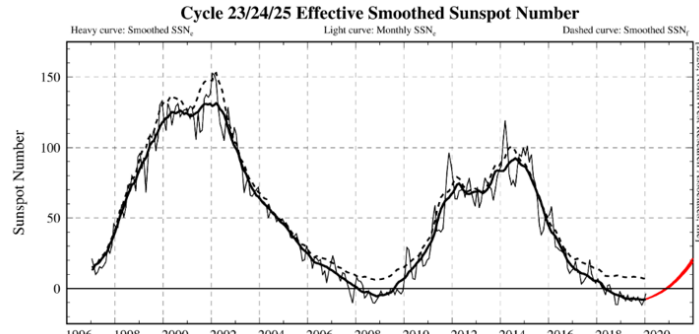
Figure 2. μ (MODIP) regions

- b. Az değeri bulunduktan sonra, STEC hesabı yapılır,
- c. Daha sonra (1) eşitliğiyle iyonosferik gecikme etkisi hesaplanır.

SAYISAL UYGULAMA VE TARTIŞMA (COMPUTATIONS AND DISCUSSION)

Tek frekanslı GNSS alıcılarında özellikle gerçek zamanlı konum belirlemede iyonosferik etki düzeltmeleri Klobuchar veya NeQuick modelleri ile yapılmaktadır. Günümüzde, yüksek doğruluk isteyen mühendislik amaçlı çalışmalarda genelde çift (çok) frekanslı alıcılar kullanıldığından, tek frekanslı alıcılarla konum belirleme genelde göz ardı edilmiştir. Oysa, tek frekanslı alıcılar dünya GNSS pazarında önemli bir orana sahiptir. Bunlara, birçok navigasyon cihazı, bazı askeri sistemlere entegre çalışan alıcılar vb. örnek olarak verilebilir. Konunun gelecekte daha da önem kazanacağı düşüncesiyle, GNSS ile tek frekanslı konum belirlemede en önemli hata kaynaklarından birisi olan iyonosferik etki hesabında en çok kullanılan iki hesap modeli karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, literatürde hesap algoritmaları genel bilgi ve teorilerle verilen söz konusu iki model ile ilgili yazılımlar hazırlanmıştır. Galileo uydu sisteminde kullanılan NeQuick_G modeli global ölçekte kullanılmakta olup, bu çalışma kapsamında hazırlanan yazılımda gerekli tablolar bu global modeldeki haliyle kullanılmıştır.

Hesaplamalarda izlenen yöntemde; 2002 yılından bu yana yaklaşık 10 yıllık periyotlarla tekrar eden güneş radyasyon yayılımının en çok ve en az olduğu yıllarda seçilen yaz ve kış günlerine karşılık gelen ikişer gün için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, güneş radyasyon yayılımının en çok ve en az olduğu yıllar sırasıyla 2002, 2009, 2014 ve 2019 olarak Şekil 3'de verilen haritadan belirlenmiş, yukarıda belirtilen her yıl 02 Ocak ve 02 Ağustos günleri için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar her gün için öğle saat 12:00 UTC ve gece saat 03:00 UTC olarak ayrı ayrı yapılarak tablolanmış. Diğer taraftan, gerçekte 2020 yılı için hesaplamalar yapılması gerekirken, bu yıla ait bazı global değerlerin (örn. R12) 2020 yılı sonunda yayınlanacak olması nedeniyle 2019 yılı alınmıştır.



Şekil 3. Güneş radyasyon yayılımı grafiği (URL1)

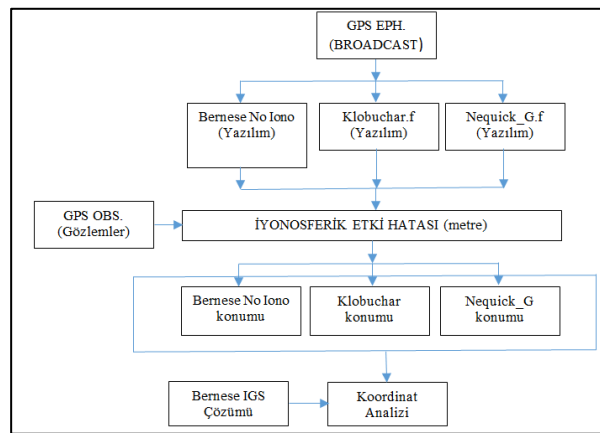
Figure 3. Smoothed Sunspot Number Graph

Sayısal uygulama, Ankara ve İstanbul TUSAGA-Aktif noktaları için yapılmış olup, hesaplamalarda kullanılan nokta konumları Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’deki μ (MODIP) değerlerine bakıldığında, Türkiye’nin Şekil 2’deki 2nci bölgede yer aldığı görülmektedir. Bu çalışmada yapılan hesaplama yöntemi ve kullanılan modeller çok genel olarak Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de verilen iş akışı, uydularla konum belirleme (GNSS) yazılımı hazırlanması kapsamında devam eden başka çalışmalarını da içermekte olup, bu çalışmada, bu iş akışının “IGS Çözümü”, “GPS OBS” ve “Koordinat Analiz” bölümlerine ilişkin sonuçlar dahil edilmemiştir. Dahil edilmemiş olan bu sonuçlar başka bir yayının konusunu oluşturmaktadır.

Çizelge 3. Sayısal uygulamada kullanılan TUSAGA-Aktif noktaları

Table 3. CORS-TR stations used in computations

Nokta Adı	Enlemi (° ' ")	Boylamı (° ' ")	Elipsoit Yüksekliği (m)	μ (°) (02 Ocak 2020)	Datum/ Epok
Ankara (ANKR)	39 53 14.535182	32 45 30.491454	976.01790	48.802	ITRF96 (2005.0)
İstanbul (ISTN)	40 59 27.462292	28 49 53.882694	77.05219	49.694	ITRF96 (2005.0)



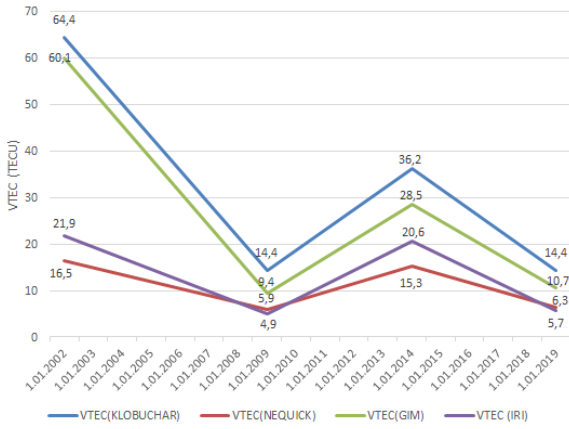
Şekil 4. Koordinat hesaplamaları genel iş akışı

Figure 4. General flowchart for coordinate computations

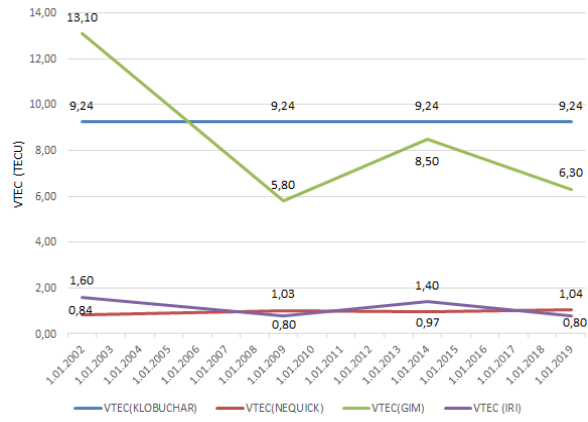
Hesaplamalar; Türkiye’nin en eski IGS noktası olan ANKR (Ankara) noktasında ve ISTN (İstanbul) noktalarının 2002, 2009, 2014 ve 2019 yılı 02 Ocak ve 02 Ağustos günlerindeki ölçüleri kullanılarak güneş

leke (sunspot) hareketlerinin en çok ve en az olduğu yaklaşık 11 yıllık devirlerde gündüz saat 12.00 (UTC) ve gece saat 03.00 (UTC) saatleri için VTEC değerleri ve bu değerlerin uydu-alıcı uzaklığındaki bozucu etkisinin büyüklüğü hesaplanmıştır. Ancak, ANKR ve ISTN noktalarına ait sonuçlar tamamen uyumlu çıktığı ve bu nedenle makale hacminin artmasını önlemek için burada sadece ANKR hesaplamalarına ait sonuçlar verilmiştir.

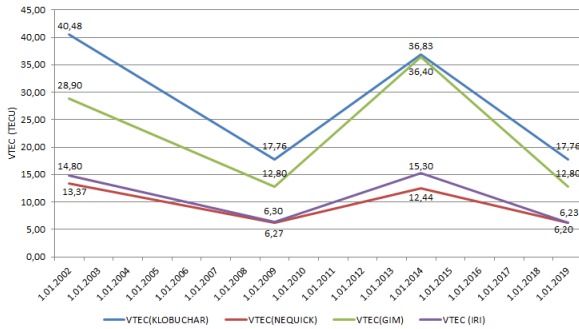
Şekil 3'de görülen güneş radyasyon dağılımının en az ve en çok olduğu yıllara ilişkin VTEC değişimi NeQuick ve Klobuchar modelleri için ayrı ayrı hesaplanmış olup, bu değerler, uluslararası standart olan ve gerek jeodezik gerekse iklim çalışmalarında kullanılan GIM (Global Ionosphere Model) ve IRI (International Reference Ionosphere) modellerinden elde edilen değerlerle de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara ilişkin grafikler Ocak ayları için Şekil 5 ve 6'da, Ağustos ayları için Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.



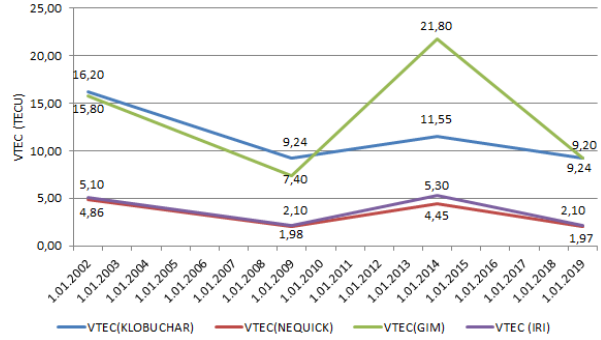
Şekil 5. ANKR VTEC değişimi (Ocak 12.00 UTC)
Figure 5. VTEC variation for ANKR (January 12.00 UTC)



Şekil 6. ANKR VTEC değişimi (Ocak 03.00 UTC)
Figure 6. VTEC variation for ANKR (January 03.00 UTC)



Şekil 7. ANKR VTEC değişimi (Ağu.12.00 UTC)
Figure 7. VTEC variation for ANKR (August 12.00 UTC)

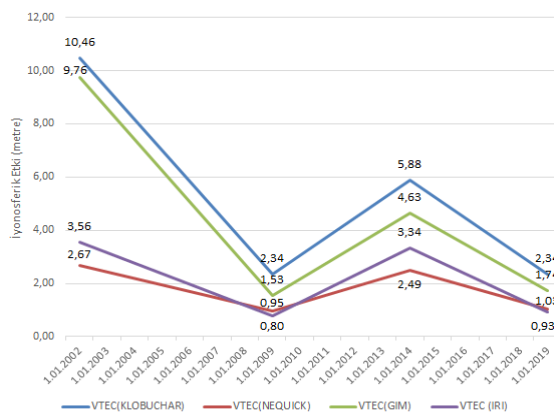


Şekil 8. ANKR VTEC değişimi (Ağu. 03.00 UTC)
Figure 8. VTEC variation for ANKR (August 03.00 UTC)

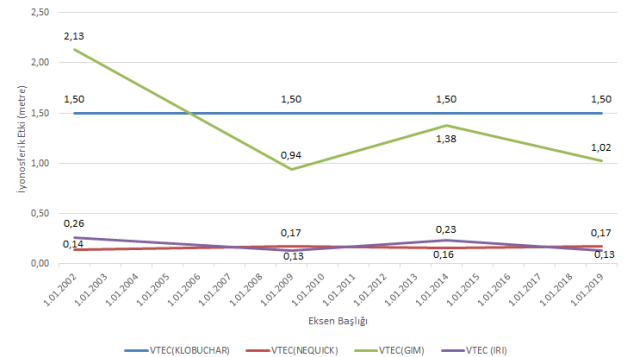
Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, GNSS çalışmalarında teorik ve deneysel olarak bilinen iki önemli sonuç teyit edilmiş olmaktadır. Buna göre; VTEC değerleri, mevsimsel etki fark etmeksizin gece en az değere inmektedir. Diğer taraftan, Klobuchar modeli ile hesaplamalarda gündüzleri Ocak ayları için geceye göre yaklaşık 5-7 katı arasında değişmekte, Ağustos ayları için ise yaklaşık 2-3 katına kadar çıkmaktadır. NeQuick modeli ile hesaplamalarda ise gündüzleri Ocak ayları için geceye göre yaklaşık 5-15 katı arasında değişmekte, Ağustos ayları için ise yaklaşık 3 katına kadar çıkmaktadır. Burada dikkati çeken ikinci husus ise; Ağustos aylarında VTEC değerlerinde, gündüze göre daha az olsa da geceleri de değişim söz konusudur. Buradan, GNSS ile konum belirlemede, güneş radyasyon dağılımının en çok olduğu yıllarda ve yaz aylarında iyonosferik etkinin geceleri de önemli hata kaynaklarından birisi

olabileceği sonucuna varılabilir. Klobuchar modeli ile hesaplama sonuçlarını ifade eden Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde dikkati çeken bir başka konu ise, gece VTEC değerlerinin (ve dolayısıyla iyonosferik etki büyüklüğünün) aynı olmasıdır. Bu ise beklenen bir durumdur. Çünkü, Klobuchar algoritması incelendiğinde (Klobuchar 1987); iyonosferik gecikme fazının 1.57'den büyük ya da eşit olması durumunda gece saatleri için sabit bir değer alınmaktadır. Bu varsayımın NeQuick modeli sonuçları ile de uyumlu olduğu Şekil 9-12'de görülmektedir.

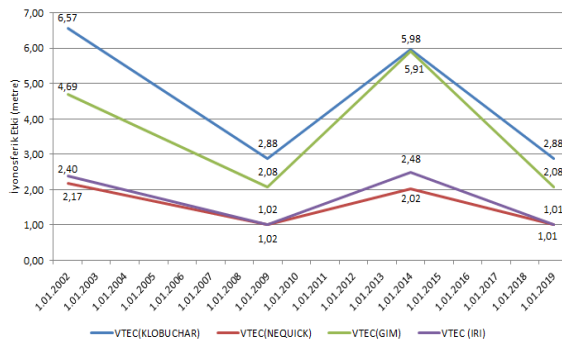
Güneş radyasyon dağılımının en az ve en çok olduğu yıllara ilişkin VTEC değerlerine bağlı olarak hesaplanmış ve GNSS uydu-alıcı uzaklıklarının hesabında bozucu etki olarak dikkate alınması gereken iyonosferik etki büyüklüğü değerleri NeQuick, Klobuchar, GIM ve IRI modelleri için ayrı ayrı hesaplanmış olup grafikleri Ocak ayları için Şekil 9 ve 10'da, Ağustos ayları için Şekil 11 ve 12'de verilmiştir.



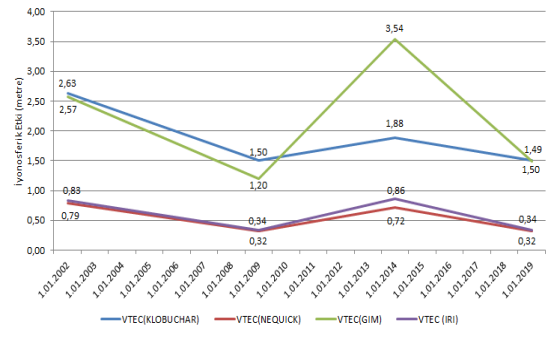
Şekil 9. ANKR İyono. Etki (Ocak 12.00 UTC)
Figure 9. IONO Effect for ANKR (January 12.00 UTC)



Şekil 10. ANKR İyono. Etki (Ocak 03.00 UTC)
Figure 10. IONO Effect for ANKR (January 03.00 UTC)



Şekil 11. ANKR İyono. etki (Ağu.12.00 UTC)
Figure 11. IONO Effect for ANKR (August 12.00 UTC)



Şekil 12. ANKR İyono. etki (Ağu. 03.00 UTC)
Figure 12. IONO Effect for ANKR (August 03.00 UTC)

İyonosferik etki büyüklüğü, VTEC değerlerine bağlı olarak hesaplandığından, VTEC grafikleri ile iyonosferik etki grafiklerinin aynı eğilimi göstermeleri beklenen bir durumdur. (Şekil 9 ve Şekil 10'da da görüldüğü gibi, iyonosferik etki büyüklüğü VTEC değerinin en az olduğu kış ayları için gece yaklaşık 20 cm, gündüz ise 1 metreyi; en çok olduğu kış ayları için ise gece yaklaşık 70 cm, gündüz ise 2 metreyi bulabilmektedir. GNSS uydu-alıcı uzaklığı hesaplarında dikkate alınmazsa, bu bozucu değerler koordinat hesaplarında hataya neden olacaktır.

Şekiller 5-12'deki grafiklerdeki sayısal değerlerden de görüleceği gibi, Klobuchar modeli ile NeQuick modeli hesaplama sonuçları arasında önemli farklılıklar görülmektedir. Bu farkların birçok nedeni bulunmaktadır. Örneğin; NeQuick modelinin Klobuchar modeline göre daha etkin ve ayrıntılı algoritmaya sahip olup, güneş radyasyon dağılımı gibi bazı global değerler (R12) deneysel olarak elde edilmektedir. Diğer taraftan, her iki model için kullanılan tek tabaka modeli tanımları farklıdır. Sonuç

olarak, bu her iki modelden elde edilen VTEC sonuçlarının doğrulukları hakkında kısmen de olsa bilgi sahibi olabilmek için Global İyonosferik Haritalardan (GIM) yararlanılabilir. Çok sayıda GIM haritaları farklı kurumlar tarafından yayınlanmakta olup, bunlardan en bilinen ve kullanılanları; IRI (URL3), IGS (URL4) ve CODE (URL5) ürünleridir. Günümüzde iyonosferik etki hesaplamalarında GIM ve IRI gibi global modeller daha fazla tercih edildiği için, bu çalışmada Klobuchar ve NeQuick modelleri ile elde edilmiş sonuçlar bu global model sonuçları ile karşılaştırılarak VTEC analizi hata hesabı (rms) yapılmıştır. Söz konusu hesaplama (4) eşitliği kullanılarak yapılmış olup, sonuç değerler Çizelge 4’de verilmiştir. Hesaplama tekniği bağlamında IRI ve NeQuick modelleri kendi arasında benzer (deneysel), GIM ile Klobuchar ise kendi arasında benzer (teorik) esaslara dayandığı için Çizelge 4’deki karşılaştırma bu özelliklerine dayanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4. GIM ve IRI modelleri ile karşılaştırmalar (VTEC analizi)

Table 4. Comparison to GIM and IRI models

Ocak Ayları	IRI ve NeQuick	GIM ve Klobuchar
Rms (03 UTC)	0.5 TECU	0.8 TECU
Rms (12 UTC)	3.8 TECU	6.5 TECU
Ağustos Ayları	IRI ve NeQuick	GIM ve Klobuchar
Rms (03 UTC)	0.4 TECU	5.2 TECU
Rms (12 UTC)	1.6 TECU	6.8 TECU

$$rms = \sqrt{\frac{\sum(VTEC_M - VTEC_R)^2}{N}} \quad (4)$$

(4) eşitliğinde;

$VTEC_M$: NeQuick ve Klobuchar modelleri ile yapılan hesaplamaları,
 $VTEC_R$: GIM ve IRI VTEC değerlerini,
 N ise toplam hesaplama yapılan nokta sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4’deki “rms” değerleri incelendiğinde, bu değerlerin TECU hesabında kabul edilen genel sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Söz konusu sınır değerler bu makalenin sonunda isimleri verilen kaynakların büyük bölümündeki sayısal uygulama sonuçlarında ve yorumlarda yer almaktadır. Rovira-Garcia vd. (2020)’de yapılmış olan bir araştırmada, küresel ölçekte, NeQuick_G modelinin Klobuchar modeline göre yaklaşık %6’lık daha doğru sonu verdiği ifade edilmektedir. Ayrıca, Orus-Perez (2017)’de, 2014 yılında yaşanmış olan maksimum güneş hareketleri döneminde tek frekanslı GNSS alıcılarındaki performans araştırılmış olup, yine küresel ölçekte, NeQuick_G modeli ile elde edilmiş olan sonuçların GPS Klobuchar modeline yatay koordinatlarda %20, düşeyde ise %11’lik daha iyi rms değerleri verdiği doğrulanmıştır.

TEC birimindeki tablo değerlerinin öneminin daha somut olarak anlaşılmasını sağlamak için hesaplamalarda iyonosfer modeli kullanmak ile kullanılmamanın nokta konum doğruluklarına etkisi örnek olmak üzere sadece 2014 yılı 02 Ocak ve 02 Ağustos günlerine ait GPS ölçüleri Bernese yazılımı (Dach vd. 2015) ile hesaplanmış olup, sonuçlar Yer merkezli kartezyen koordinat farkları cinsinden Çizelge 5’de verilmiştir. Dolayısıyla, makalenin kapsamını; makale başlığı ile sınırlı tutmak ve sadece iyonosferik etkinin büyüklüğüne odaklanmak amacıyla burada yalnızca ANKR noktası için yapılan sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 5. Bernese Yazılımı ile İyonosferik etki “hesaplanmış” ve “hesaplanmamış” koordinat farkları*Table 5. Iono computed and non-iono-computed coordinate differences using Bernese Software*

BERNESE HESAP MODELİ	$\Delta X \pm \sigma$ (m)	$\Delta Y \pm \sigma$ (m)		$\Delta Z \pm \sigma$ (m)
İyonosferik etki var-iyonosferik etki yok(02.01.2014)	-7.51±0.06	-4.97±0.05		-7.54±0.06
İyonosferik etki var-iyonosferik etki yok(02.08.2014)	-6.63 ±0.06	-4.18 ±0.05		-6.20±0.06

Çizelge 5’de verilen sonuçlar yorumlanırken Bernese yazılımı ile yapılmış olan hesap parametreleri dikkate alınmalıdır (Dach vd. 2015). Bu bağlamda hesaplamalarda, makaledeki çalışmanın amacına uygun olarak L1 kod ölçüleri ile Saastamoinen troposferik modeli ve IGS sonuç yörünge bilgileri kullanılmıştır (faz ölçüleri ve hesaplama teknikleri kullanılmamıştır). Dolayısıyla, olası tüm hata kaynakları modellenerek sadece iyonosferik etki dikkate alınacak şekilde bir model oluşturulmuştur. Çizelge 5’de verilen sonuçlar teori ile uyumlu olup, buradan da görüleceği gibi, iyonosferik etki GNSS ölçü ve hesaplamalarında önemli bir hata kaynağıdır ve ölçülere (özellikle gerçek zamanlı konum belirlemede) bu düzeltmeler mutlaka getirilmelidir. Bu ise, gelecekte Türkiye’de de üretilmesini hayal ettiğimiz yerli ve millî GNSS alıcı yazılımlarında dikkate alınması gereken önemli konudur.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan elde edilmiş olan sonuçlar incelendiğinde, Türkiye’de tek frekanslı GNSS alıcısı üretimi söz konusu olduğunda, alıcı yazılımları içerisinde, en önemli hata kaynaklarından olan iyonosferik etki hesabı için Klobuchar veya NeQuick_G modellerinin gerçek zamanlı birçok pratik uygulama için yeterli sonucu sağlayacağı değerlendirilmektedir. Hangi modelin kullanılmasının daha iyi olacağı ise kullanılacak alıcının teknik özelliklerine bağlıdır. Örneğin, eğer üretilecek GNSS alıcısı üst düzey teknik özelliklere (bellek kapasitesi, hız vb.) sahip değilse Klobuchar modeli basit ve hızlı bir algoritmadır. Diğer taraftan, Klobuchar’a göre biraz daha iyi bir konum doğruluğu hedefleniyorsa ve bazı global modellerin kullanımı GNSS alıcısı kapasitesini ve hızını zorlamayacaksa NeQuick_G modeli daha uygun bir algoritmadır. Klobuchar modelinin NeQuick modeline göre çok daha kolay hesaplama olanağına sahip olduğu göz önüne alındığında, Rovira-Garcia vd. (2020)’de ifade edilmiş olan, %6’lık bir iyileştirmenin gerçek zamanlı uygulamalarda ne kadar yararlı olacağı kullanım amacına bağlı olarak farklılık gösterecektir. Sonuç olarak, üretilecek GNSS alıcısının hangi amaçlar için kullanılacağı ve dolayısıyla beklenen gerçek zamanlı doğruluk, hangi modelin kullanılacağını belirleyen en önemli konulardır. Diğer taraftan, GLONASS navigasyon mesajları iyonosferik düzeltme parametrelerini içermemektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada kullanılmış olan Klobuchar ve NeQuick_G modellerinin, GLONASS gözlemlerindeki iyonosferik etki hesabı için de kullanılabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde tüm dünyada kullanımda olan tek frekanslı GNSS alıcı sayısının toplam GNSS alıcısı sayısına oranının %75 olarak tahmin edildiği dikkate alınırsa, bu algoritmaların önemi daha da artmaktadır. Diğer taraftan, bundan daha da önemlisi, tek frekansta kod ölçüleri ile gerçek zamanlı konum belirlemede atmosferik etkilerin olabildiğince giderilmesi, elde edilecek gerçek zamanlı koordinatların doğruluğunu önemli ölçüde artıracaktır. Bunun sonucunda da gerçek zamanlı konum belirlemenin askerî ve sivil amaçlı kullanım alanları oldukça artacaktır. Sonuç olarak, tek frekanslı alıcılar için iyonosferik modellere ilişkin karşılaştırmaların daha çok sayıda ve farklı coğrafi bölge ve zaman dilimleri için yapılması ve elde edilecek sonuçlara bağlı olarak belki de Türkiye için farklı bir bölgesel modelin geliştirilmesinin gerekebileceği açıktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aragon-Angel A., Orus, R., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. ve Sanz J., 2006, "Preliminary NeQuick assessment for future single frequency users of Galileo", in *Proceedings of the 6th Geomatic Week*, Barcelona, Spain.
- Bidaine, B., Prieto-Cerdeira, R. ve Orus, R., 2006, "NeQuick: In-Depth Analysis and New Developments", In *Proceedings of the 3rd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC*, Noordwijk, The Netherlands.
- Ciećko, A. ve Grunwald, G., 2020, "Klobuchar, NeQuick G, and EGNOS Ionospheric Models for GPS/EGNOS Single-Frequency Positioning under 6–12 September 2017 Space Weather Events", *Appl. Sci.*, 10, 1553; doi:10.3390/app10051553.
- Dach R., Lutz, S., Walser, P. ve Fridez, P., 2015, "Bernese GNSS Software Version 5.2", *Astronomical Institute*, University of Bern.
- Di Giovanni, G. ve Radicella, S.M., 1990, "An Analytical Model of the Electron Density Profile in the Ionosphere", *Adv. Space Res.*, 10 (11), 27-30.
- EC, 2016, "European GNSS (Galileo) open service ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users". European Commission.
- Hoffmann-W.B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008, "GNSS-Global Navigation Satellite Systems", Springer-Verlag Wien, eISBN: 978-3-211-73017-1.
- IS-GPS-200K, 2019, *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces*.
- ITU-R, 2019, "Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems", *Recommendation ITU-R P.531-14.P Series Radio wave propagation*.
- Jin, R., Jin, S. ve Feng, G., 2012, "M_DCB: MATLAB code for estimating GPS satellite and receiver differential code biases", *GPS Solution*, 16, 541–548.
- Kahveci, M., 1997, "Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kahveci M., ve Yıldız F., 2018, "GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri", 10.basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Klobuchar J.A., 1987, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users". *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems* ;(3):325-331.
- Klobuchar, J.A. ve Doherty, P.H., 1990, "The Statistics of Ionospheric Time Delay for GPS Ranging on L1." *Proceedings of the ION GPS-90, the 3rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Colorado Springs, CO, 19-21 September*, The Institute of Navigation, Washington, DC, pp.161-168.
- Komjathy A., 1990, "Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System", *Technical report Nr.188*, Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick.
- Naoki, A. ve Kazuaki, H., 1998, "Correction of ionospheric delay on GLONASS using the GPS navigation message", In *Proceedings of the ION GPS*, Long Beach, CA, USA; pp. 667–671.
- Orus-Perez R., 2017, "Ionospheric error contribution to GNSS single frequency navigation at the 2014 solar maximum", *J Geodesy* 91(4):397–407.
- OS SIS ICD-2006, "Galileo Open Service, Signal in Space Interface Control Document", *European Space Agency*.
- Paakki, T., DellaRosa, F. ve Nurmi, J., 2015, "PVT Computation Issues in Mixed Galileo/GPS Reception In: Nurmi, J. Lohan, E. S. Sand, S. Hurkskainen, H., eds. GALILEO Positioning Technology", Springer, New York.
- Piriz, R., Roldan, P., Golcz, R., Moriana, C. ve Leute, J., 2016, "Performance of the NeQuick G iono model for single-frequency GNSS timing applications", *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, IEEE.

- Prieto-Cerdeira R., Orus-Peres, R., Breeuwer, E., Lucas-Rodriguez, R. and Falcone, M., 2014, "Performance of the Galileo Single-Frequency Ionospheric Correction During In-Orbit Validation", *GPS world*, 25(6), 53-58.
- Rovira-Garcia, A., Ibanez-Segura, D., Orus-Perez, R., Juan, J.M., Sanz, J. and Gonzalez-Casado, G., 2020, "Assessing the quality of ionospheric models through GNSS positioning error: methodology and results", *GPS Solutions*, 24:4.
- Schaer S, 1999," *Mapping and predicting the earth's ionosphere using global positioning system*", Doctoral dissertation, Astronomy Institute, University Bern, Switzerland.
- Wolfgang R.D. ve Thaller, D., 2013, "IERS Annual Report, International Earth Rotation and Reference Systems Service", *Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*, 2014. 157 pp., ISBN 978-3-86482-073-1.
- URL1: <https://spawx.nwra.com/spawx/ssne-cycle.html> , ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL2: The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field, [Online], <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL3: International Reference Ionosphere. <https://iri.gsfc.nasa.gov/>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL4: International GNSS Service. <http://www.igs.org/products>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL5: <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.



BAZI FENOLİK KİRLİLİKLERİN İMİDAZOL TÜREVLİ KALIKS[4]AREN İÇEREN MANYETİK NANOPARTİKÜLLER KULLANARAK SULU ÇÖZELTİLERDEN UZAKLAŞTIRILMASI

¹Ezgi AKCEYLAN , ²Serkan ERDEMİR , ³Egemen ÖZÇELİK , ⁴Begüm TABAKCI 

^{1,2,4}Selcuk University, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Konya, TURKEY

³Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Chemical Engineering, Konya, TURKEY

¹eakceylan@selcuk.edu.tr, ²serdemir82@selcuk.edu.tr, ³egemen.ozcelik@ktun.edu.tr,

⁴btacakci@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 09.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.02.2021)

ÖZ: Bu çalışmada imidazol türevli kaliks[4]arenlerin sentezi, bu bileşiklerin [3-(2,3-epoksipropoksi)-propil]-trimetoksilan (EPPTMS) modifiyeli Fe₃O₄ nanopartikülüne immobilize edilmesi ve elde edilen nanopartiküllerin bazı fenolik kirleticiler için adsorpsiyon özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak hedef bileşikler sentezlemek üzere bir dizi kaliks[4]aren türevi (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8) literatür prosedürüne göre sentezlenmiş ve yapıları doğrulanmıştır. Bu bileşiklerden 6 nolu bileşik Mannich reaksiyonu ile imidazol ile etkileştirilerek hedef bileşik 7 elde edilmiştir. Diğer taraftan 8 nolu karşılıklı iki adet bromo grubu taşıyan kaliks[4]aren türevi yine imidazol ile etkileştirilerek diğer hedef bileşik olan 9 bileşiği sentezlenmiştir. Bu bileşikler daha sonra EPPTMS modifiyeli Fe₃O₄ nanopartikülüne immobilize edilerek imidazol grubu taşıyan kaliks[4]aren bağlı yeni manyetik nanopartiküller (K-7-BMN ve K-9-BMN) elde edilmiştir. Bu yeni nanopartiküller fenol (FEN), *p*-klorofenol (*p*KF) ve *p*-nitrofenol (*p*NF)'ün sulu çözeltiden adsorpsiyonunda adsorban olarak kullanılmıştır. Sonuçlar K-9-BMN'nin pH 6 da *p*KF için en yüksek adsorpsiyonu gerçekleştirdiğini, K-7-BMN'nin ise hiçbir fenolik tür için kayda değer bir adsorpsiyon göstermediğini ortaya çıkarmıştır. Adsorpsiyon sürecinde elektrostatik etkileşimler ve hidrojen bağı etkileşimlerinin özellikle önemli olduğu ve bunların ortam şartlarına bağlı olarak adsorban türlerinin yapısıyla yakından ilgili olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kaliksaren, fenolik kirlilik, manyetik nanopartikül, adsorpsiyon.

Removal of Some Phenolic Pollutions from Aqueous Solutions by Magnetic Nanoparticles Containing Imidazole-Derivatized Calix[4]arene

ABSTRACT: In this paper, it was aimed to synthesize imidazole-derived calix[4]arenes, immobilize these compounds to [3-(2,3-epoxypropoxy)-propyl]-trimetoxysilane (EPPTMS) modified Fe₃O₄ nanoparticles, and investigate adsorption properties of the obtained nanoparticles for some phenolic pollutants. For this purpose, a series of calix[4]arene derivatives (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8) were synthesized according to literature procedures and their structures were verified to synthesize target compounds. Compound 6 among of these compounds was reacted with imidazole by Mannich reaction to achieve target 7. Calix[4]arene derivative bearing two distal bromo groups 8 was also reacted with imidazole to achieve another target compound 9. These compounds were then immobilized to the EPPTMS modified Fe₃O₄ nanoparticle to obtain calix[4]arene-bonded new magnetic nanoparticles (C-7-BMN and C-9-BMN) bearing imidazole group. These nanoparticles were used as adsorbents in the adsorption of phenol (PHE), *p*-chlorophenol (*p*CF) and *p*-nitrophenol (*p*NP) from the aqueous solution. The results revealed that C-9-BMN performed the highest adsorption for *p*CF at pH 6, while C-7-BMN showed no

remarkable adsorption for any phenolic species. It has been understood that electrostatic interactions and hydrogen bond interactions are particularly important in the adsorption process and they are closely related to the structure of adsorbent species depending on the ambient conditions.

Key Words: *Calixarene, phenolic pollution, magnetic nanoparticle, adsorption.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlar bir döngü sistemi içerisinde bulunan doğal kaynak sularını temiz olduklarını varsayarak kullanmaktadırlar. Halbuki doğal kaynak suları dediğimiz yer altı suları dahi sürekli kirlenmektedir. Bunun sebepleri hem biyolojik hem de kimyasal olabilmektedir. Böylece su kaynakları zamanla kirlenip toksik bir hal alabilmektedir.

Türkiye’de yer altı sularının başlıca kirlenme sebepleri olarak;

- Evsel atıkların direkt olarak yer altı sularına arıtmadan ulaşması,
- Endüstrilerin bol su kaynağı bulunan ovaları tercih etmesi ile zamanla atıklarının bu bölgelerdeki toprağa ve dolayısı ile sulara karışması,
- Tarım ilaçları ve gübrelerin kullanımının son yıllarda artış göstermesi söylenebilir.

Endüstrinin atık suları incelendiğinde fenol ve türevleri gibi organik kirleticilerin, yüksek oranda bulunduğu görülmüştür. Endüstride arıtmadan deşarj edilen fenollü atık sular çevrede serbest olarak dolaşırlar. Fenol suda kolayca çözünür. Dolayısıyla bu bileşik yer altı sularına, nehir ve göllere taşınır. Fenol en zehirli 126 kimyasalın içinde 11. sıradadır. Kolay yükseltgenebilir olduklarından sudaki oksijeni azaltırlar. Sularda çok az miktarda bulunsada dahi klorlanma aşamasında suyun tat ve kokusunda değişikliğe sebep olurlar (Dinçyürek, 2006). Fenolik bileşikler arasında fenol ve klorofenoller çevresel kirleticiler arasında en önemli kirleticiler olup yeraltı sularını tehdit etmektedirler. Balıklar için toksisite seviyesi 5-25 mg/L arasında olup endüstriyel atık sulardan yaklaşık 3000-4000 mg/L aralığında fenolik bileşikler içeren atık sular alıcı ortamlara deşarj edilmektedir. Dolayısıyla bu durum sucul ortamı tehdit etmektedir. Tipik zeytinyağı üretimi sırasında çıkan zeytin kara suyunun fenolik içeriği 10.000 mg/L’nin üzerindedir. Fenol ve türevleri sucul yaşam, bitki ve mikroorganizmalar için biyolojik taşınımında olumsuz anlamda önemli rol oynar. Ayrıca bu tip bileşiklerin yüksek toksisitesi yüzünden ölümcül etkileri de bulunmaktadır. Bundan dolayı fenolik bileşiklerin atık sulardan giderimi çok önemli bir konu haline gelmiştir. Bunun yanında giderimde nasıl bir proses uygulanacağı da akla gelen diğer bir sorudur. Fenolik maddeler içeren atık suların arıtılmasında fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemler kullanılmaktadır. Fiziksel ve kimyasal arıtımda genellikle adsorpsiyon ve membran prosesleri, biyolojik arıtımda ise mikroorganizmalar tercih edilmektedir (Deveci, 2014).

Kaliks[n]arenler (n= 4, 6 ve 8), bazik ortamda fenol ve formaldehitin uygun koşullarda tepkimesi sonucu sentezlenen halkalı yapıdaki oligomerlerdir. Bu oligomerler uygun koşullarda istenilen boyutlarda sentezlenebilmektedir (Akpınar ve diğ., 2019; Erdemir ve diğ., 2016 ve 2019; Özcelik ve diğ., 2019; Tabakci ve diğ., 2013; Temel, 2020; Temel ve diğ., 2017 ve 2019) . Literatürde bu bileşiklerin polimerik destek üzerinde hareketsiz hale getirilmesi, sert yapıları nedeniyle iyon bağlama ve/veya adsorpsiyon için çok yararlı bir yaklaşım olduğu bildirilmiştir (Tabakci, 2008 ve 2010; Tabakci ve Yılmaz, 2008; Bieber ve diğ., 2020; Dogan ve diğ., 2020; Ekin Dolaksız ve diğ., 2018; Temel ve Kutluay, 2020; Temel ve diğ., 2020). Bunlar arasında imidazol grubu içeren kaliksarenlerin hidrojen bağı oluşturma kabiliyetleri nedeniyle anyonlar için çok etkili malzemeler olduğu bilinmekteydi (Tabakci, 2012). Dolayısıyla bu çalışmada farklı bölgelerinde imidazol grubu içeren kaliksarenler demir nanopartiküllere bağlanarak elde edilen kaliksaren bağı bu yeni nanopartiküllerin sulu çözeltiden bazı fenolik kirlilikler için adsorpsiyon davranışları incelenmiştir.

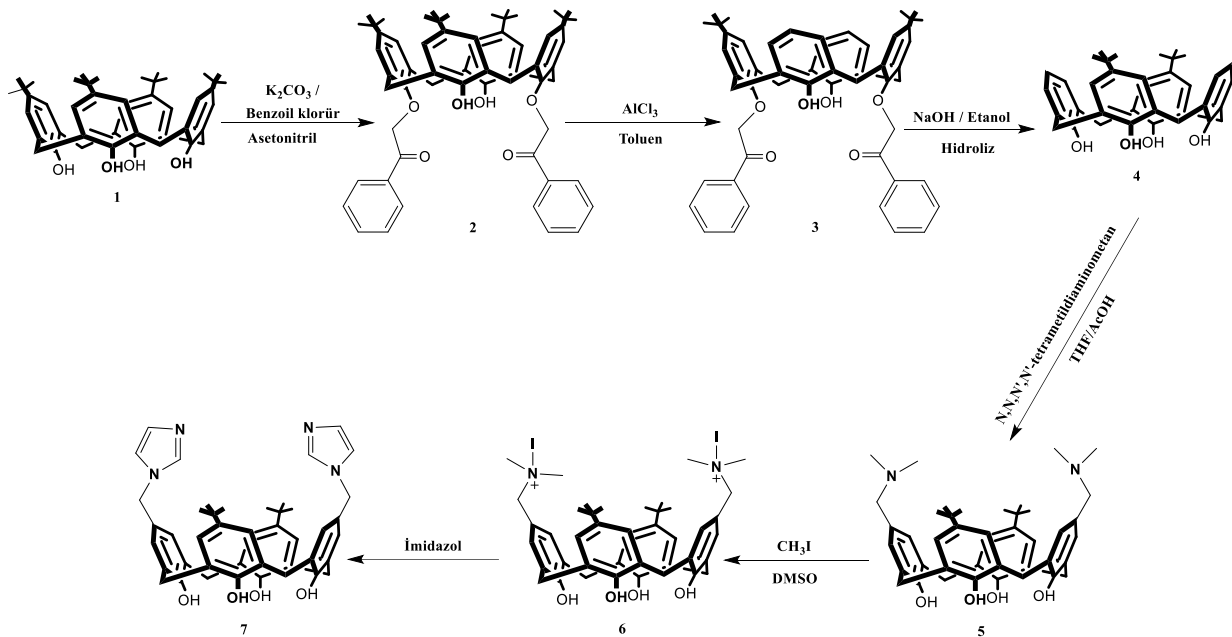
MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Kimyasallar ve Cihazlar (Chemicals and Equipments)

Erime noktası tayinleri, Büchi B-540 marka erime noktası tayin cihazı ile yapıldı. $^1\text{H-NMR}$ spektrumları CDCl_3 içinde 400 MHz Varian 6105 spektrofotometreleri ile alındı ve standart olarak TMS kullanıldı. $^1\text{H-NMR}$ spektrumunda kimyasal kayma değerleri (δ) ppm cinsinden belirtildi. FTIR spektrumları Perkin Elmer 100 FTIR spektrofotometresinden alındı. Geçirimli elektron mikroskop (TEM) resimleri JEOL 1220 JEM cihazı ile alınmıştır. HPLC ölçümlerinde ise Shimadzu Prominence-i serisi LC-2030-3D model cihazı kullanıldı. HPLC sisteminde kolon olarak Agilent Eclipse Plus Phenyl-Hexyl kolon ($5 \mu\text{m}$, $4.6 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$) kullanıldı. HPLC sisteminde mobil faz olarak MeOH (%1 AcOH v:v) ve ultra saf su (%1 AcOH) çözeltileri hazırlandı ve sisteme hacimce %60 MeOH olacak şekilde verildi. Kolon fırın sıcaklığı 30°C 'a ayarlandı. Akış hızı 1 mL/dakika olarak belirlendi. Enjeksiyon hacmi $50 \mu\text{L}$ olarak gerçekleştirildi. Tüm kromatogramlar 280 nm 'de kaydedildi. Analiz süresi 10 dakika olarak ayarlandı. Çözeltilerinin pH ayarlamaları için Orion 420A pH metresi kullanıldı. Tüm ölçümler en az 3 kez tekrarlandı. İnce tabaka kromatografisi, silika jel (SiO_2 , Merck 60 F₂₅₄) ile kaplanmış alüminyum plakalar kullanarak yapıldı. Deneylerde kullanılan maddeler 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.

Sentezler (Syntheses)

Bu çalışmada hedeflenen kaliksaren türevleri (1-8) (Şekil 1) ve kaliksaren bağlı manyetik nanopartiküller (K-7-BMN ve K-9-BMN) literatürdeki metotlara (Gutsche, 1990; Li ve diğ., 1999; Dalbavie ve diğ., 2000; Tabakcı, 2010; Akceylan ve diğ., 2015) göre ya da onlara adapte edilerek aşağıda verilen sentez prosedürlerine göre sentezlendi. Bileşik 9 ile manyetik nanopartiküller K-7-BMN ve K-9-BMN bu çalışmada ilk kez sentezlendi.

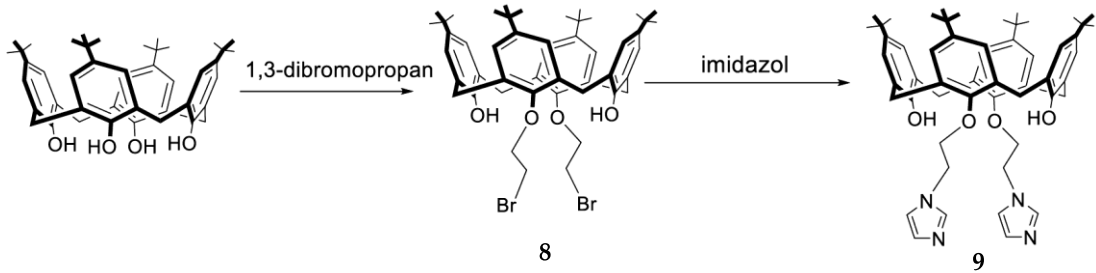


Şekil 1. Kaliks[4]aren türevleri 1-7 için sentez şeması.

Figure 1. Synthesis scheme for calix[4]arene derivatives 1-7.

Bileşik 9'un Sentezi (Synthesis of Compound 9)

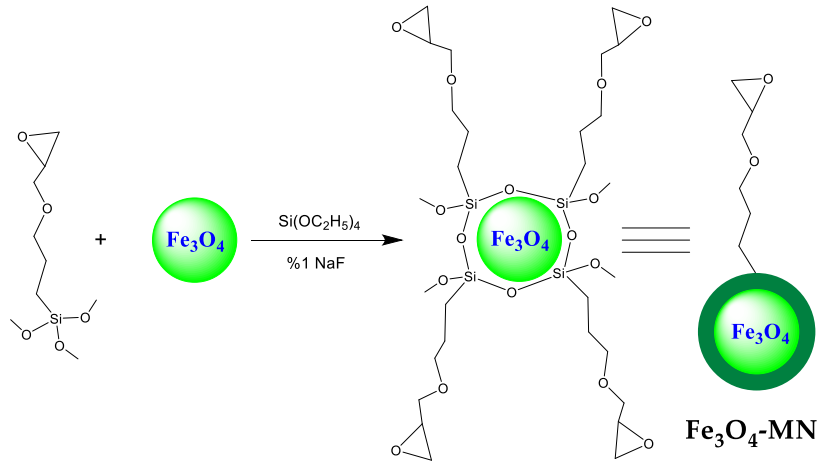
1 g (1,54 mmol) 1 nolu bileşik ile 0,53 g (3,85 mmol) K_2CO_3 ve 3,16 mmol imidazol ve katalitik miktarda KI, 100 mL asetonitril içinde 24 saat geri soğutucu altında kaynatılır. Reaksiyon tamamlandığında çözücü vakum altında uzaklaştırılır, katı diklorometan ile çözülür, 1 M HCl ile yıkanır. Organik faz ayrılır, $MgSO_4$ ile kurutulduktan sonra çözücü vakum altında uzaklaştırılır. Metanol ile yıkanarak reaksiyona girmeyen imidazol uzaklaştırılır, elde edilen katı madde kurutulur bileşik 9 elde edilir (Li ve ark., 1999) (Şekil 2). Verim; %85, E.n.; $283^\circ C$ 1H NMR ($CDCl_3$), δ (ppm): 0,94 (s, 18H, But); 1,38 (s, 18H, But); 1,81 (brs, 4H, $OCH_2CH_2CH_2N$); 2,63 (brs, 4H, CH_2N); 3,38 (d, $J=12,1$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$); 4,12 (d, $J=12,3$ Hz, 4H, $ArCH_2Ar$); 5,06 (brs, 4H, OCH_2); 6,56 (s, 2H, $ArOH$), 6,75 (s, 4H, ArH); 7,12 (s, 4H, ArH); 7,25 (s, 2H, İm-H); 8,16 (s, 2H, İm-H); 9,56 (s, 2H, İm-H). $C_{56}H_{72}N_4O_4$ için Anal. Hesaplanan (%): C, 77,74; H, 8,39; N, 6,48. Bulunan (%): C, 77,61; H, 8,43; N, 6,46.



Şekil 2. Kaliks[4]aren türevleri 8 ve 9 için sentez şeması.
Figure 2. Synthesis scheme for calix[4]arene derivatives 8 and 9.

İmidazol Grubu Taşıyan Kaliks[4]Aren Türevlerinin Manyetik Nanopartiküllere İmmobilizasyonu (Immobilization Of Calix[4]Arene Derivatives Bearing Imidazole Group To Magnetic Nanoparticles)

Literatür (Akceylan ve diğ., 2015) metoduna göre hazırlanan Fe_3O_4 manyetik nanopartikülleri (Fe_3O_4 -MN) (Şekil 3) 7 ve 9 nolu imidazol grubu taşıyan kaliksaren türevlerine fenolik-OH kısımlarından immobilize edildi. Bunun için 1 g 7 veya 9 nolu bileşik ve 1,5 g K_2CO_3 50 mL asetonitril içerisinde 30 dakika kaynatıldıktan sonra 1 g Fe_3O_4 -MN ilave edilip 75 saat kaynatılarak karıştırıldı. Daha sonra manyetik olarak ayrılan bileşik reaksiyona girmeyen kaliks[4]aren içeriğini uzaklaştırmak için sırasıyla diklormetan, etanol ve daha sonra su ile yıkanıp vakum altında kurutulur. Böylece 7 ve 9 nolu kaliksaren bağlı manyetik nanopartiküller (K-7-BMN ve K-9-BMN) elde edilir (Şekil 4).



Şekil 3. Epoksi uçlu Fe_3O_4 nanopartiküllerin sentezi.
Figure 3. Synthesis of epoxy-terminated Fe_3O_4 nanoparticles.

Adsorpsiyon Çalışmaları (Adsorption Studies)

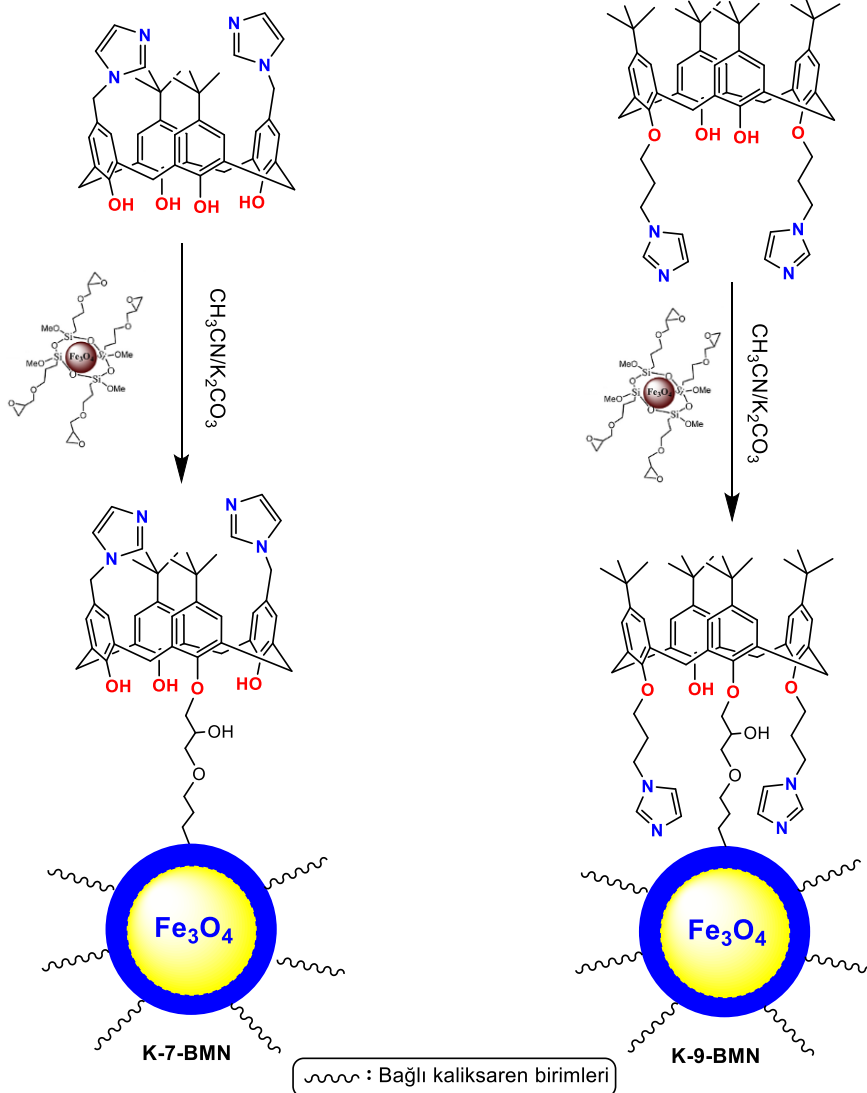
Katı-sıvı sorpsiyon çalışmaları aşağıdaki gibi gerçekleştirildi:

- Hazırlanan nanopartiküllerden 15 mg alınarak ağız kapaklı erlenlere konur.
- Üzerine 10 mL 5.0×10^{-5} M fenol bileşiklerinin çözeltisinden ilave edilir.
- Daha sonra bu çözeltiler 25°C 'da 1 saat süre ile çalkalayıcı yardımı ile etkileştirilir.
- Bu süre sonunda karışım santrifüj edilerek sulu kısım ayrılır.
- Çözeltilerin reaksiyon sonrası konsantrasyonları HPLC ile tayin edilir.
- Adsorpsiyon yüzdesi (%A) aşağıda verilen denklem (1) kullanılarak hesaplanır.

$$\%A = \frac{C_0 - C_s}{C_0} \quad (1)$$

C_0 : Standart çözeltinin kromatogramındaki pik altında kalan alan

C_s : Adsorpsiyon sonrasında çözeltinin kromatogramındaki pik altında kalan alan.

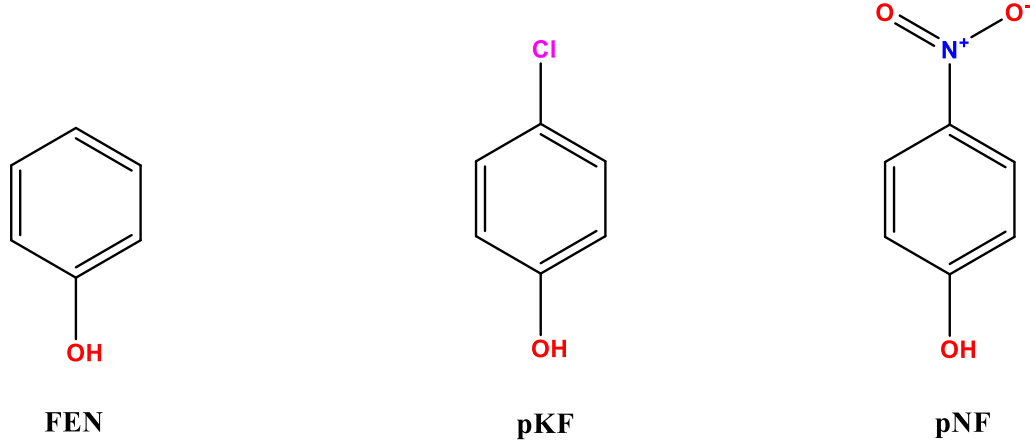


Şekil 4. Farklı kısımlarından imidazol grubu içeren kaliks[4]aren bağlı manyetik nanopartiküller **K-7-BMN** ve **K-9-BMN**'nin sentezi.

Figure 4. Synthesis of calix[4]arene-bonded magnetic nanoparticles **K-7-BMN** and **K-9-BMN** containing imidazole groups from different parts.

Farklı Fenol Türlerinin Adsorpsiyon Üzerine Etkisi (Effect of Different Phenol Species on Adsorption)

Bu deneyde, **K-7-BMN** ve **K-9-BMN**'nin farklı fenol türlerine karşı adsorpsiyon özellikleri incelendi. Bunun için 5.0×10^{-5} M fenol (**FEN**), *p*-nitrofenol (**pNF**) ve *p*-klorofenol (**pKF**) (Şekil 5) çözeltileri hazırlandı. Hazırlanan bu çözeltiler 25°C'da 15 mg hazırlanan **K-7-BMN** ve **K-9-BMN** ile ayrı ayrı etkileştirildi ve %A değerleri hesaplandı.



Şekil 5. Çalışmada kullanılan fenolik bileşikler.

Figure 5. Phenolic compounds used in the study.

Çözelti pH Değerinin Adsorpsiyon Üzerine Etkisi (Effect of Solution pH Value on Adsorption)

Bu deneyde, değişen pH'larda fenolik türlerin adsorpsiyonu incelendi. Bunun için 5.0×10^{-5} M fenol stok çözeltilerinden değerleri 2.0; 6.0 ve 10.0 olmak üzere farklı pH değerlerine sahip çözeltiler hazırlandı. Hazırlanan bu çözeltiler 25°C'da 15 mg **K-7-BMN** ve **K-9-BMN** ile ayrı ayrı etkileştirildi ve %A değerleri hesaplandı.

BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

Farklı kullanım alanlarına sahip olan ve sınırsız türevlendirilebilme yeteneğine sahip kaliksarenler, host-guest kimyasında iyonik bileşiklerin etkileşimi için uygun bileşiklerdir. Farklı destek yapılarına immobilizasyonu gerçekleştirilerek, polimerik veya nanopartikül yapıları elde edilerek, yapılara farklı özellikler kazandırılabilir ve kullanım alanları genişletilebilir.

Bu çalışmada, sulu ortamlarda fenolik bileşiklerin giderilmesi için imidazol grubu içeren kaliks[4]aren türevlerinin bağlı olduğu iki farklı demir nanopartikül (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) hazırlandı ve karakterizasyonu gerçekleştirildi. Bu amaçla, öncelikle hedeflenen kaliks[4]aren türevleri sentezlendi. Sentezlenen yapılar, ¹H-NMR spektroskopisi, FT-IR spektroskopisi kullanılarak karakterize edildi ve TEM ile de hazırlanan nanopartiküllerin yüzey morfolojisi aydınlatıldı.

Kaliksaren bileşiğinin yapısı dikkate alındığında, *p*-konumu (üst kısım) ve fenolik-O tarafı (alt kısım) olmak üzere iki farklı bölgesinden fonksiyonlandırılabilirdiği görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada aynı fonksiyonel grubun bu iki farklı konumda bulunmasının fenolik bileşenlerin adsorpsiyonuna etkisinin incelenmesi de amaçlandı. Bu amaçla hedeflenen bileşiklerin sentezi ve karakterizasyonu aşağıdaki gibi gerçekleştirildi.

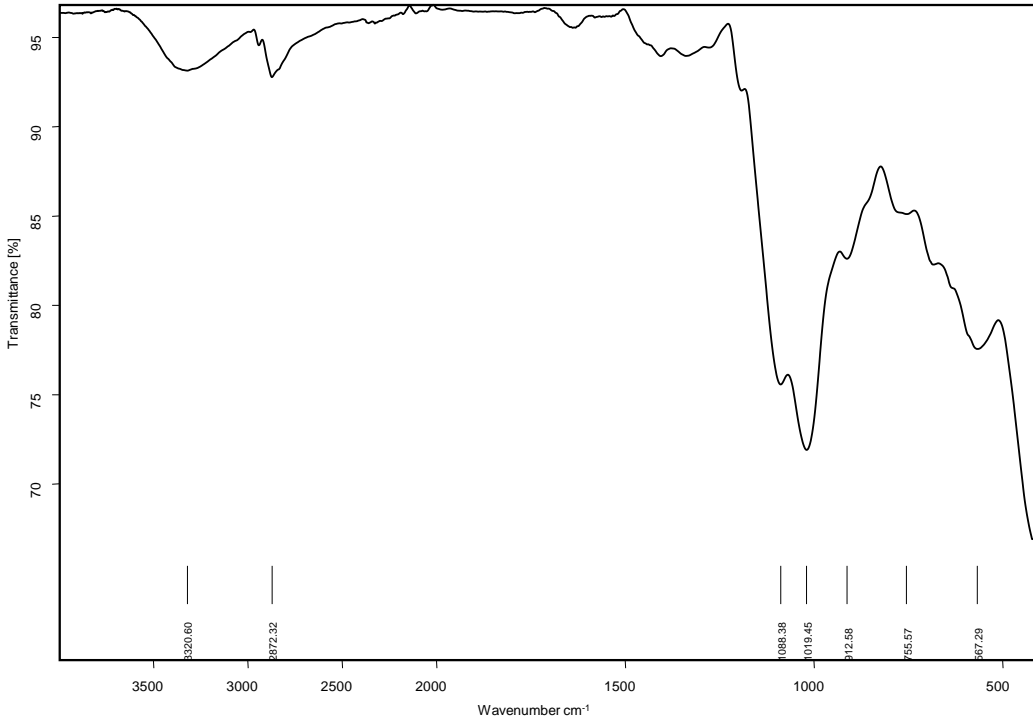
Hedeflenen bileşiklerin elde edilebilmesi için öncelikle başlangıç bileşiği olarak *p*-ter-bütülfenol ve formaldehitin bazik ortamdaki kondenzasyon reaksiyonu sonucunda *p*-ter-bütülfenol kaliks[4]aren bileşiği (**1**) elde edildi ve yapısı doğrulandı (Gutsche, 1990). *p*-ter-Bütülfenol kaliks[4]aren **1** bileşiği kullanılarak fenolik hidroksi grubu üzerinden benzoil klorür ile etkileştirilerek iki benzoil grubu içeren kaliks[4]aren türevi **2** sentezlendi ve yapısı doğrulandı (Dalbavie ve diğ., 2000). Kaliks[4]aren türevi **2** daha sonra toluen

ortamında alüminyum klorür ile etkileştirilerek iki *ter*-bütil grubu giderildi. Böylece kaliks[4]aren türevi 3 elde edildi ve yapısı doğrulandı (Dalbavie ve diğ., 2000). Kaliks[4]aren türevi 3'ün NaOH katalizörlüğünde etanol-su ortamında hidroliz edilerek benzoil gruplarının giderilmesi sonucunda ise kaliks[4]aren türevi 4 sentezlendi ve yapısı doğrulandı (Dalbavie ve diğ., 2000). İki *ter*-bütil grubu içeren kaliks[4]aren türevi 4 ise THF ve asetik asit ortamında N,N,N',N'-tetrametildiaminometan reaktifi ile etkileştirilerek *p*-konumlarından (dimetilamino)metil grubu içeren kaliks[4]aren türevi 5 elde edildi (Tabakcı, 2010). Kaliks[4]aren türevi 5'in azot atmosferi altında DMSO ortamında metil iyodür ile etkileştirilmesi sonucunda ise kuaterner amonyum grubu içeren kaliks[4]aren türevi 6 elde edildi (Tabakcı, 2010). Elde edilen kuaterner amonyum türevi 6, hedef bileşiklerden biri olan *p*-konumundan iki imidazol grubunun bağlı olduğu kaliks[4]aren türevi 7'nin sentezinde başlangıç maddesi olarak kullanıldı. Bu bileşik (6) DMSO ortamında sekonder bir amin olan imidazol ile etkileştirilerek hedef kaliks[4]aren türevi 7 sentezlendi ve yapısı doğrulandı (Tabakcı, 2010).

Diğer taraftan fenolik-O tarafından iki imidazol grubu taşıyan ikinci hedef bileşiği sentezlemek amacıyla öncelikle başlangıç bileşiği olarak sentezlenen *p-ter*-bütilkaliks[4]aren 1, bu kez asetonitril ortamında ve K₂CO₃ varlığında 1,3-dibromopropan ile etkileştirilerek iki bromopropil grubu içeren kaliks[4]aren türevi 8 sentezlendi ve yapısı doğrulandı (Li ve diğ., 1999). Daha sonra bu bileşik (8) asetonitril ortamında ve K₂CO₃ varlığında imidazol ile etkileştirilerek iki propilimidazol grubu taşıyan hedef kaliks[4]aren türevi 9 bu çalışmada ilk kez sentezlendi. Bu bileşiğin yapısı ¹H NMR spektroskopisi ile aydınlatıldı.

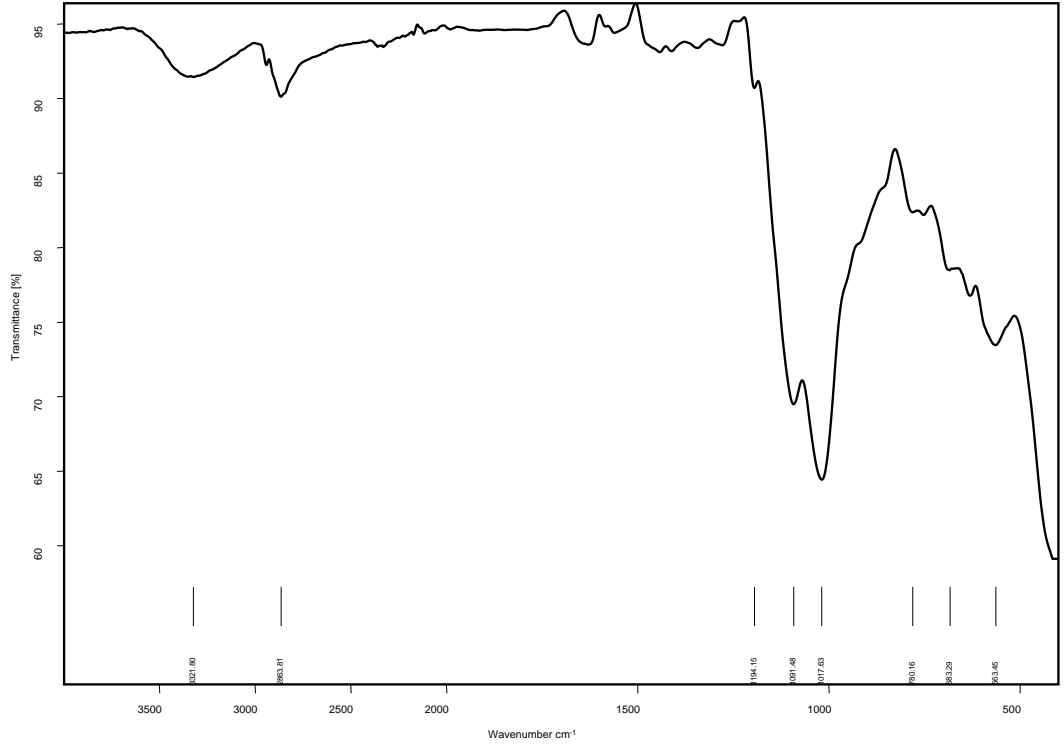
Kaliksaren Bağlı Manyetik Nanopartiküllerin Sentezi (Synthesis of Calixarene Bonded Magnetic Nanoparticles)

Öncelikli olarak Fe₃O₄ manyetik nanopartikülleri hazırlandıktan (Yong ve ark., 2008) sonra EPPTMS ile etkileştirilerek EPPTMS modifiyeli manyetik nanopartiküller (Fe₃O₄-MN) elde edildi (Şekil 4). Daha sonra sentezlenen 7 ve 9 nolu kaliks[4]aren türevleri asetonitril ortamında ve K₂CO₃ varlığında Fe₃O₄-MN üzerine immobilize edilerek kaliks[4]aren türevi bağlı yeni manyetik nanopartiküller (K-7-BMN ve K-9-BMN) elde edildi (Akceylan ve diğ., 2015).



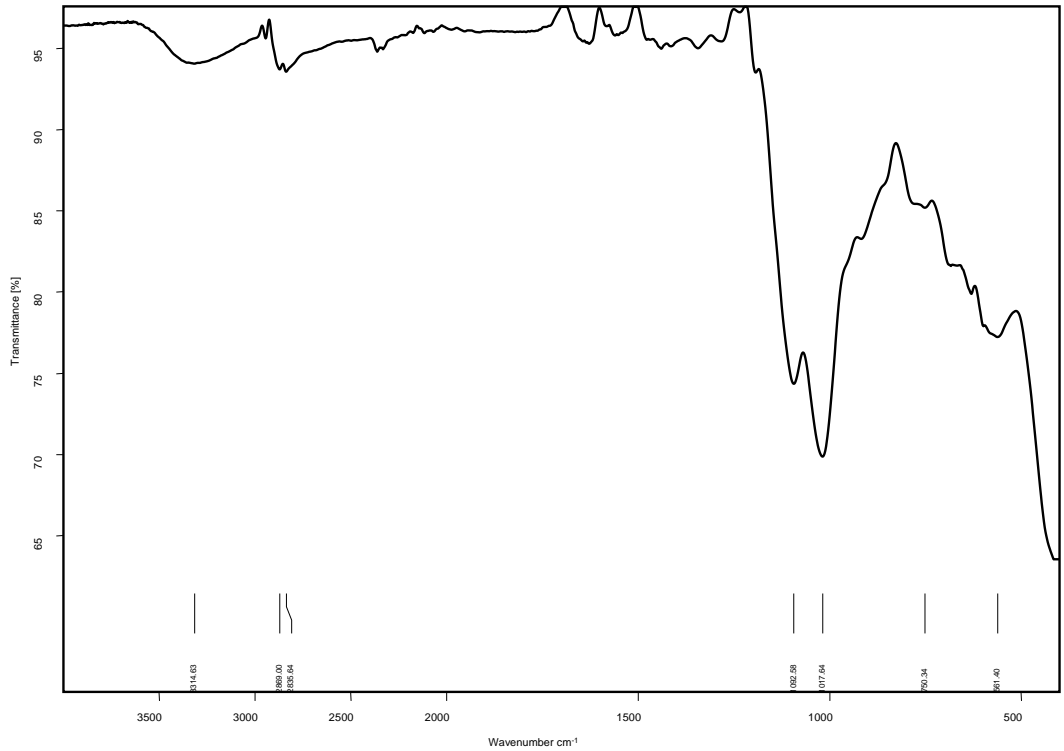
Şekil 6. Fe₃O₄-MN'nin FTIR spektrumu.

Figure 6. FTIR spectrum of Fe₃O₄-MN



Şekil 7. K-7-BMN'nin FTIR spektrumu.

Figure 7. FTIR spectrum of K-7-BMN.



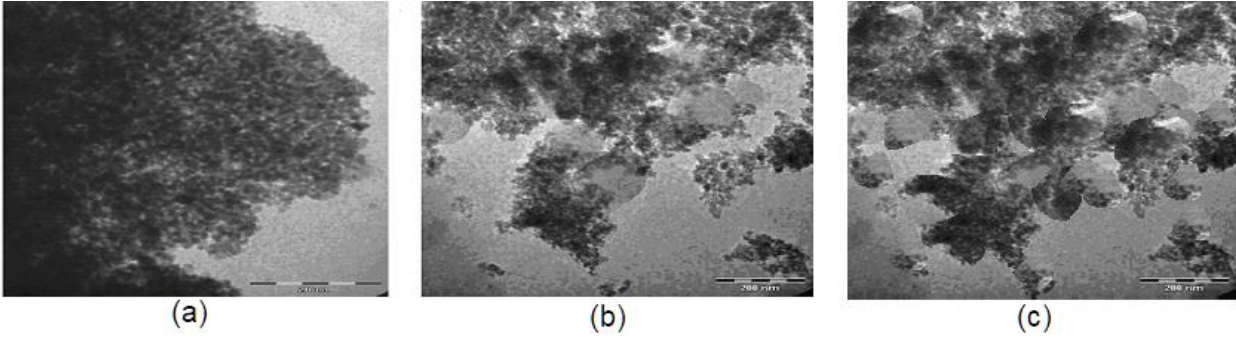
Şekil 8. K-9-BMN'nin FTIR spektrumu.

Figure 8. FTIR spectrum of K-9-BMN.

Epoksi grubu taşıyan nanopartiküller ve yeni manyetik nanopartiküller **K-7-BMN** ve **K-9-BMN**'nin FTIR spektrumları alındı ve sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verildi. Epoksi grubu taşıyan nanopartiküllerin FTIR spektrumlarındaki 1019 cm^{-1} deki Si-O- bağlarına 3400 cm^{-1} civarındaki O-H bağına ait geniş bandın varlığı epoksi grubunun bağlandığını doğrulamaktadır. Diğer taraftan **K-7-BMN**

ve **K-9-BMN**'nin FTIR spektrumlarındaki 1498-1583 cm⁻¹ aralığındaki geniş bandlar imidazol gruplarına ait C-N ve C-C titreşim gerilmelerine işaret etmektedir. Ek olarak, **K-7-BMN** için 1017, 905 ve 563 cm⁻¹ deki, **K-9-BMN** için ise 1017, 900 ve 561 cm⁻¹ deki bantlar kaliksaren birimlerinin terminal Si-O ve Fe-O gruplarına ait olup bağlanmayı desteklemiştir.

Elde edilen kaliks[4]aren türevi bağlı yeni manyetik nanopartiküllerin (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) yüzey morfolojilerini incelemek üzere bağlanmadan önceki demir nanopartiküllerin ve kaliksaren bağlandıktan sonraki nanopartiküllerin TEM fotoğrafları alındı. Şekil 9a'daki TEM fotoğrafına bakıldığında nanopartiküller, manyetik nanopartikülleri arasında itici kuvvetin olmaması nedeniyle yoğun agregatlar olarak gözlenmektedir. Bunun esas olarak EPPTMS ile modifiye edilmiş Fe₃O₄'ün yaklaşık 10 ± 2 nm olan nano boyutundan kaynaklanmaktadır. Bu durum EPPTMS ile modifiye edilmiş manyetit parçacıklarının manyetik çekirdeğinin tipik çapı 8 ± 3 nm olan tek bir manyetik kristalitinden oluştuğuna ve bu farkın EPPTMS kaplamasına karşılık geldiğine dair dolaylı bir kanıt olarak düşünülebilir. Kaliks[4]aren immobilizasyonundan sonra, partiküllerin dağılımı büyük ölçüde değişmiş görünmektedir (Şekil 9b ve Şekil 9c). Bu durum Fe₃O₄ nanopartikülleri ve kaliks[4]aren arasındaki elektrostatik itme kuvveti ve sterik engel ile kolayca açıklanabilir.



Şekil 9. (a) Fe₃O₄-MN (b) **K-7-BMN** ve (c) **K-9-BMN**'nin TEM görüntüleri.

Figure 9. TEM images of (a) Fe₃O₄-MN (b) **K-7-BMN** and (c) **K-9-BMN**.

Adsorpsiyon Çalışmaları (Adsorption Studies)

Hazırlanan yeni manyetik nanopartiküller (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) adsorban olarak kullanılarak önemli çevre kirleticilerden olan bazı fenol türevlerinin fenol (FEN), *p*-klorofenol (*p*KF) ve *p*-nitrofenol (*p*NF)'nin katı-sıvı (batch tipi) adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirildi.

Adsorpsiyon çalışmaları kapsamında 5.0x10⁻⁵ M'lık fenol çözeltileri hazırlandı ve 15 mg manyetik nanopartikül (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) ile etkileştirilerek farklı fenol türlerinin adsorpsiyonu incelendi. Bu amaçla öncelikle kaliksaren türevi içeren manyetik nanopartiküllerin (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) sulu ortamlarda FEN, *p*KF ve *p*NF fenolik türlere karşı adsorpsiyon özellikleri incelendi. Bunun için katı-sıvı (batch) adsorpsiyon çalışması için 5.0x10⁻⁵ M'lık ve pH değerleri 2, 6 ve 10 olacak şekilde sulu çözeltileri hazırlandı. Hazırlanan çözeltilerden 10'ar mL alınarak bir erlen içerisinde 15 mg adsorban ile bir saat boyunca çalkalayıcı yardımı ile etkileştirildi. Etkileşim süresi tamamlandıktan sonra karışım santrifüjlendi. Ayrılan sıvı kısım HPLC de analiz edildi. Farklı pH değerlerindeki fenolik bileşiklerin etkileşim sonrasında elde edilen sonuçları analiz edilirken, adsorpsiyon yüzdesi değerleri kullanılarak hesaplandı.

Adsorpsiyon kapasitesinin (mg analit/g adsorbent) hesaplanması için aşağıdaki denklem (2) kullanıldı.

$$q_0 = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad (2)$$

Burada C₀ analitin başlangıç konsantrasyonu (mM), C_e analitin adsorpsiyon sonrası konsantrasyonu

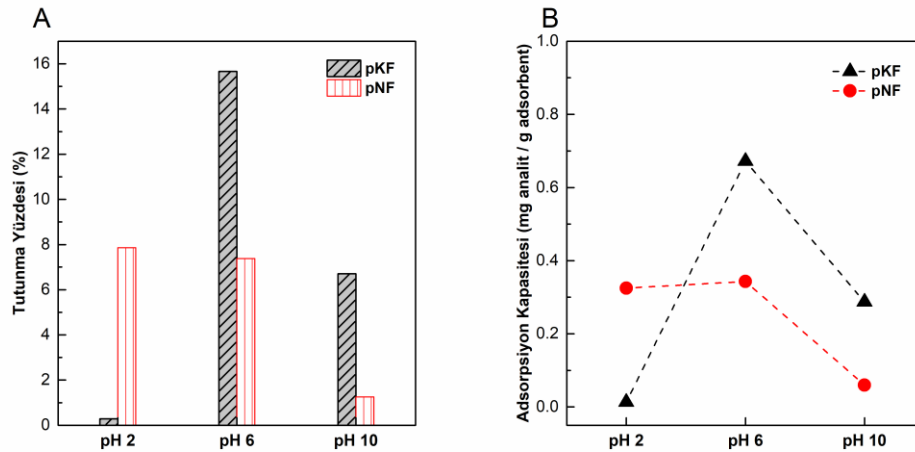
(mM), V analit hacmi (L), ve m adsorbent miktarı (g) olarak değerlendirildi. Elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de verildi.

Çizelge 1. K-9-BMN’nin fenolik bileşikleri adsorpsiyon sonuçları (280 nm).

Table 1. Adsorption results of phenolic compounds of K-9-BMN (280 nm).

pH	Analit	Tutunma Yüzdesi (%)	Adsorpsiyon Kapasitesi (µg/g)
2	FEN	-	-
	pKF	0,29	13
	pNF	7,86	325
6	FEN	-	-
	pKF	15,66	672
	pNF	7,38	343
10	FEN	-	-
	pKF	6,71	287
	pNF	1,25	60

Çizelgedeki değerlerden pH 6’da pKF’nin en yüksek adsorpsiyon yüzdesine sahip olduğu görülmektedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde adsorpsiyonda fenollerin üzerindeki elektron çeken gruplar ve kaliksaren imidazol grupları arasındaki etkileşimlerin önemli olduğu açıkça görülmektedir. Bu etkileşimler; fenolik-O ve protonlanmış imidazol grupları arasındaki elektrostatik etkileşim, fenolik hidrojen ile imidazol azotu arasındaki hidrojen bağı etkileşimleri ve $\pi-\pi$ etkileşimleridir. Sonuçlar bu etkileşimlerden fenolik-O (fenolat anyonu) ve protonlanmış imidazol grupları arasındaki elektrostatik etkileşimin diğerlerine göre daha baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Öyleki pNF ve pKF bileşiklerine bakıldığında nitro grubunun aromatik halkadan elektron çekme etkisinin klor atomundan daha fazla olması sonucu fenolik oksijen üzerindeki elektron yoğunluğunun pKF durumunda artması, diğer taraftan ise kaliksaren birimlerindeki imidazol azotunun fenolik hidrojenini alarak protonlanması ile katyonik bir yapı oluşurken aynı zamanda fenolat anyonunun oluşması sonucu böyle bir etkileşime yol açtığı düşünülmektedir. Bu sonuç, daha önce literatürde yapılan bir çalışmayla (Wu ve diğ., 2015) da uyumludur. Yapılan çalışmada imidazol içerikli zeolit ile yapılan adsorpsiyon çalışmasında benzer sonuçlar elde edilmiş, pH 5 değerinde pKF yapısının pNF yapısından daha iyi adsorpsiyon özelliğine sahip olduğu açıklanmıştır (Wu ve diğ., 2015).

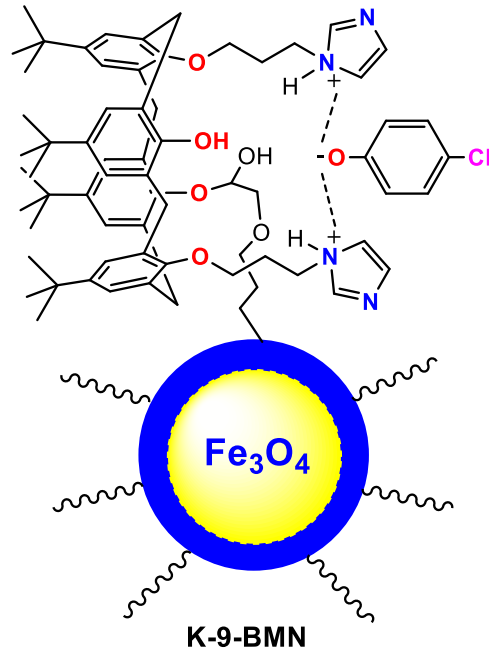


Şekil 10. K-9-BMN’nin (A) fenolik bileşiklerin tutma yüzdeleri (B) fenolik bileşikler için adsorpsiyon kapasiteleri (mg analit / g adsorbent).

Figure 10. (A) K-9-BMN’s retention percentages of phenolic compounds (B) adsorption capacities for phenolic compounds (mg analyte/g adsorbent).

Elde edilen sonuçlar sayısal olarak değerlendirildiğinde FEN için hiçbir pH değerinde algılamanın gerçekleşmediği, *p*KF için en yüksek tutunma yüzdesinin pH 6'da %15.7 olduğu, *p*NF için en yüksek algılama değerinin pH 2'de %7.9 olduğu görüldü. Adsorpsiyon kapasiteleri *p*KF için pH 6'daki kapasitesi 672 µg *p*KF/g adsorbent olarak hesaplandı. Literatürdeki (Wu, 2015) sonuçlar ile karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Elde edilen veriler grafiksel olarak Şekil 10'da verildi.

Şekil 11, **K-9-BMN**'nin *p*KF ile muhtemel etkileşimlerini göstermektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi kaliksaren imidazol birimlerinin *p*KF'nin fenolik hidrojenini almasıyla protonlanarak katyonik hale, fenolün ise fenolat anyonuna dönüşmesi sonucu bu iki yapının (anyonik ve katyonik türler) elektrostatik etkileşimi ön plana çıkmaktadır. Bu elektrostatik etkileşimlere hidrojen bağı ve π - π etkileşimlerinin de katkı sağlamasıyla adsorpsiyonun gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 11. **K-9-BMN**'nin *p*KF ile elektrostatik etkileşimleri.

Figure 11. Electrostatic interactions of **K-9-BMN** with *p*KF.

Burada ayrıca bilinmelidir ki daha önce yapılan bir çalışmada (Ekin Dolaksız, 2018), *p*-ter-bütikaliks[4]aren türevi içeren silika partiküllerinin fenolik bileşikleri adsorpsiyon çalışmasında, yapı itibarıyla daha fazla hidrojen bağlanma bölgelerinin olması hidrojen bağı etkileşimlerini daha baskın hale getirmiş dolayısıyla da böyle bir durumda fenolik türlerden daha kuvvetli hidrojen bağı yapabilen *p*NF'nin adsorpsiyonu *p*KF'ye göre daha fazla olmuştur. Bu sonuç fenolik türlerin adsorpsiyonunda adsorban maddenin yapısının önemini açıkça ortaya koymuştur.

Son olarak *p*KF'nin en yüksek adsorpsiyonunun gerçekleştiği şartlarda **K-7-BMN** ile adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirilmiş ancak *p*KF için kayda değer bir sonuç elde edilememiştir. Bunun sebebinin **K-7-BMN** yapısına bakıldığında adsorpsiyonda etkili olması beklenen imidazol gruplarının aralarında kalan *ter*-bütil gruplarının bu etkileşimleri olumsuz yönde etkilenmesinden (sterik etki) kaynaklandığı söylenebilir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada farklı bölgelerinde imidazol grubu taşıyan kaliks[4]aren türevi bağlı manyetik nanopartiküller (**K-7-BMN** ve **K-9-BMN**) elde edildi ve yapıları FT-IR ve TEM ile karakterize edildi. Hazırlanan **K-7-BMN** ve **K-9-BMN** ile katı-sıvı adsorpsiyon yöntemi kullanılarak bazı fenolik türlerin (FEN, *p*NF ve *p*KF) farklı pH koşullarındaki adsorpsiyon çalışmaları gerçekleştirildi. Sonuçlardan en iyi

adsorpsiyonun **K-9-BMN**'nin pH 6'da *p*KF'ye karşı olduğu ve %15,7 oranında gerçekleştiği görüldü. **K-9-BMN**'nin *p*KF için adsorpsiyon kapasitesi 672 µg *p*KF / g adsorbent olarak hesaplandı. Aynı şartlarda **K-9-BMN** ile fenolik türlerin tutunma yüzdeleri *p*KF > *p*NF > FEN şeklinde hesaplandı. **K-7-BMN**'nin genel olarak tüm fenolik türler için kayda değer bir etki ortaya koymadığı görüldü. Bunun sebebinin de **K-7-BMN**'nin yapısında bulunan ve imidazol grupları ile aynı bölgede bulunan *ter*-bütil gruplarının fenolik türlerin bu bölgeye yaklaşmasını engellediği sonucuna varıldı. Adsorpsiyon işleminde *p*KF ve *p*NF adsorpsiyonunun yarışmalı olduğu dolayısıyla da adsorpsiyon mekanizmasında *p*KF için elektrostatik etkileşimlerin baskın olduğu şartların etkili olduğu, *p*NF için ise hidrojen bağı etkileşimlerinin baskın olduğu şartların etkili olduğu sonucuna varıldı. Böylece fenolik türlerin adsorpsiyonunda adsorban maddenin yapısal özelliklerinin hangi fenolik türün adsorplanacağı konusunda önemli bir rol oynadığı ortaya çıkarılmış oldu.

Sonuç olarak bu çalışmada hazırlanan **K-9-BMN** adsorbantı kullanılarak adsorpsiyon metoduyla toksik bir fenolik tür olan *p*KF'nin sulu çözeltilerden kayda değer bir verimle giderilmesi başarılıdır. Bu sonuca göre projede sentezlenen kaliks[4]aren temelli bileşiklerin ve adsorbantların, kullanılan metotların ve ortaya çıkan sonuçların, fenolik türlerin giderilmesi veya geri kazanılması amacıyla yapılacak olan bilimsel çalışmalara ve endüstriyel proseslere katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimi tarafından 18401047 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akceylan, E., Uyanık, A., Eymur, S., Sahin, O., Yılmaz, M., 2015, "Calixarene-Proline Functionalized Iron Oxide Magnetite Nanoparticles (Calix-Pro-MN): An Efficient Recyclable Organocatalyst for Asymmetric Aldol Reaction in Water", *Applied Catalysis A: General*, Vol. 499, pp. 205-212.
- Akpınar, M., Temel, F., Tabakci, B., Özcelik, E., Tabakci, M., 2019, "A Phenyl Glycinol Appended Calix[4]arene Film for Chiral Detection of Ascorbic Acid on Gold Surface", *Analytical Biochemistry*, Vol. 583, p. 113373.
- Bieber, V.S., Özcelik, E., Cox, H. J., Ottley, C.J., Ratan, J.K., Karaman, M., Tabakci, M., Beaumont, S.K., Badyal, J.P.S., 2020, "Capture and Release Recyclable Dimethylaminomethyl-Calixarene Functional Cloths for Point-Of-Use Removal of Highly Toxic Chromium Water Pollutants", *ACS Applied Materials Interfaces*, Vol. 12, No. 46, pp. 52136–52145.
- Dalbavie, J.-O., Regnouf-de-Vains, J.-B., Lamartine, R., Lecocq, S., Perrin, M., 2000, "Complexation of Cobalt(II) at the Upper Rim of Two New Calix[4]Arene/Bipyridine-Based Podands", *European Journal of Inorganic Chemistry*, Vol. 2000, No. 4, pp. 683-691.
- Deveci, E. Ü., 2014, "Fenol ve Fenol Türevi Bileşiklerin Biyolojik Parçalanabilirliği", *2nd International Symposium on Environment and Morality*, Adıyaman University, 664-672, 24-26 October 2014.
- Dinçyürek, Ö., 2006, *Termik Santral Uçucu Kül Tiplerinin Atıksulardaki Fenolün Adsorpsiyon Yöntemi ile Giderim Etkinliklerinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Dogan, M., Temel, F., Tabakci, M., 2020, "High-Performance Adsorption of 4-Nitrophenol onto Calix[6]arene-Tethered Silica from Aqueous Solution", *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, Vol. 30, No. 10, pp. 4191-4202.
- Ekin Dolaksız, Y., Temel, F., Tabakci, M., 2018, "Adsorption of Phenolic Compounds onto Calix[4]arene-Bonded Silica Gels From Aqueous Solutions", *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 126, pp. 27-35.
- Erdemir, S., Tabakci, B., Tabakci, M., 2016, "A Highly Selective Fluorescent Sensor Based on Calix[4]arene Appended Benzothiazole Units for Cu²⁺, S²⁻ and HSO₄⁻ Ions in Aqueous Solution", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 228, pp. 109-116.

- Erdemir, S., Ahmed Ahmed, H.M., Tabakci, B., 2019, "Fast and Reversible "Turn on" Fluorescent Sensors Based on Bisphenol-A for Zn²⁺ in Aqueous Solution", *Journal of Fluorescence*, Vol. 29, pp. 1079-1087.
- Gutsche, C. D., Iqbal M., 1990, "*p*-*tert*-Butylcalix[4]arene", *Organic Syntheses*, Vol. 68, p. 234.
- Li, Z.T., Ji, G.Z., Zhao, C.X., Yuan, S.D., Ding, H., Huang, C., Du, A.L., Wei, M., 1999, "Self-Assembling Calix[4]arene [2]Catenanes. Preorganization, Conformation, Selectivity, and Efficiency", *Journal of Organic Chemistry*, Vol. 64, pp. 3572-3584.
- Ozcelik, E., Temel, F., Erdemir, S., Tabakci, B., Tabakci, M., 2019, "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*, Vol. 95, pp. 35-48.
- Tabakci, B., 2010, *Bazı Monomerik ve Polimerik Kaliksarenlerin Sentezi ve Enzim-Mimik Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Tabakci, B. Alici, O., Karatas, I., 2013, "*4-tert*-Butylcalix[4]arene Having Nitrile Pendant Groups as Hg²⁺ Selective Receptors", *Talanta*, Vol. 106, pp. 92-96.
- 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*, Vol. 61, pp. 53-60.
- Tabakci, M. ve Yilmaz, M., 2008, "Sorption Characteristics of Cu(II) Ions onto Silica Gel-Immobilized Calix[4]arene Polymer in Aqueous Solutions: Batch and Column Studies", *Journal Hazardous Materials*, Vol. 151, No. 2-3, pp. 331-338.
- Tabakci, M., Tabakci, B., 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*, Vol. 68, pp. 4182-4186.
- Temel, F., Ozcelik, E., Ture, A.G., Tabakci, M., 2017, "Sensing Abilities of Functionalized Calix[4]arene Coated QCM Sensors Towards Volatile Organic Compounds in Aqueous Media", *Applied Surface Science*, Vol. 412, pp. 238-251.
- Temel, F., Erdemir, S., Tabakci, B., Akpınar, M., Tabakci, M., 2019, "Selective Chiral Recognition of Alanine Enantiomers by Chiral Calix[4]arene Coated Quartz Crystal Microbalance Sensors", *Analytical Bioanalytical Chemistry*, Vol. 411, pp. 2675-2685.
- Temel, F., 2020, "One Novel Calix[4]arene Based QCM Sensor for Sensitive, Selective and High Performance-Sensing of Formaldehyde at Room Temperature", *Talanta*, Vol. 211, p. 120725.
- Temel, F., Kutluay, S., 2020, "Investigation of High-Performance Adsorption for Benzene and Toluene Vapors by Calix[4]arene Based Organosilica (CBOS)", *New Journal of Chemistry*, Vol. 44, No. 30, pp. 12949-12961.
- Temel, F., Turkyilmaz, M., 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*, Vol. 125, p. 109540.
- Wu, C.-S., Xiong, Z.-H., Li, C., Zhang, J.-M., 2015, "Zeolitic Imidazolate Metal Organic Framework ZIF-8 with Ultra-High Adsorption Capacity Bound Tetracycline in Aqueous Solution", *RSC Advances*, Vol. 5, pp. 82127-82137.
- Yong, Y., Bai, Y., Li, Y., Lin, L., Cui, Y., Xia, C., 2008, "Preparation and application of polymergrafted magnetic nanoparticles for lipase immobilization", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 320, pp. 2350-2355.



EXTREMUM SEEKING BASED FAULT ESTIMATION FOR OUTPUT FEEDBACK CONTROL OF FLEXIBLE-JOINT ROBOT MANIPULATOR

Selami BEYHAN

İzmir Democracy University, Electrical and Electronics Engineering, Uckuyular Dist., 35140 Karabağlar, İzmir,
TÜRKİYE

selami.beyhan@idu.edu.tr

(Geliş/Received: 30.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.02.2021)

ABSTRACT: In this paper, an extremum seeking fault estimation based output feedback controller is proposed for the control of flexible-joint robot manipulator. First, using the approximate nonlinear robot model, a extremum seeking controller is designed to minimize the tracking error via output feedback. Then, in order to prevent the effects of faults, disturbances or unknown dynamics, an extremum seeking based fault estimator is proposed. In order to show that the advantage of the proposed configuration, a flexible-joint manipulator with unknown fault is controlled both in a numerical simulation and real-time experiment. An artificial payload is applied to the end-effector in a simulation environment. But, in the real-time experiment, an additional payload attached to the end effector when it is continuing the process. The approximate model of the robot manipulator is obtained by the state-space identification. As a result using the proposed estimation and controller, acceptable tracking and estimation results are obtained both in numerical and real-time experiments for future applications.

Key Words: *Extremum seeking optimization, output feedback control, fault estimation and tolerance, flexible-joint manipulator, varying payload, stability.*

Ekstremum Arama Temelli Hata Tahmini ile Esnek Bağlantılı Robot Kolunun Çıkış Geri Besleme Kontrolü

ÖZ: Bu çalışmada, ekstremum arama hata tahmini ve ekstremum arama temelli çıkış geri besleme kontrolcüsü doğrusal olmayan esnek-bağlantılı robot kolu için önerilmiştir. İlk olarak, doğrusal olmayan sistemin yaklaşık modeli kullanılarak izleme hatasını minimize etmek için çıkış geribesleme ile ekstremum arama denetleyicisi tasarlanmıştır. Daha sonra hataların, bozucu etkilerin ve bilinmeyen dinamiklerin etkisini yok etmek için ekstremum arama hata tahminleyicisi tasarlanmıştır. Önerilen hata tahminleyici temelli kontrolün avantajını göstermek için bilinmeyen yüke sahip esnek-bağlantılı robot kolu benzetim ortamında ve gerçek zamanlı olarak kontrol edilmiştir. Benzetim ortamında yapay bir yük uygulanmıştır. Fakat gerçek-zamanlı deneyde, esnek bağlantılı robot kolu çalışmaya devam ederken üzerine ek yük bağlanmıştır. Esnek-bağlantılı robot kolunun yaklaşık modeli ise durum uzayı tanımlama ile elde edilmiştir. Sonuç olarak önerilen tahminleyici ve kontrolör yöntemi ile gelecek uygulamalar içinde kabul edilebilir izleme ve tahmin sonuçları hem benzetim ortamında hem de gerçek-zamanlı deneylerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Ekstremum arama metodu, çıkış geribesleme kontrol, hata tahmini ve toleransı, esnek bağlantılı robot kolu, değişken yük ve kararlılık.*

1. INTRODUCTION

Industrial systems have always unmodeled dynamics, disturbances or time-varying parameters. Therefore, in order to get accurate performances of the real-time control, suitable controller design must be selected. The effect of the unmodeled dynamics might be compensated with robust controllers when the approximate model of the system is known. However, if there is no available mathematical model of the system; adaptive control, identification-based control or some classical control methods can be designed (Astrom et al. 1994, Spooner et al. 2002). Some of these control methods have fault tolerant behavior due to the compensation of integrative error, so that small magnitude of unknown dynamics can be compensated. On the other hand, when the system fault is large, an auxiliary estimator and controller are to be designed for the accurate tracking (Noura et al. 2009).

Extremum seeking control (ESC) is a real-time constrained optimization-based control approach (Krstic et al 2000, Ariyur et al. 2003, Dochain et al. 2011). Fundamentally, extremum seeking scheme optimizes a cost function by calculating the second-order gradient information with respect to its parameter. For the feedback control design, the cost function is a tracking error or a function of the system output, then the optimizing parameter is the control signal of the system. ESC does not use the mathematical model of the system therefore it has been recently much attention for the control applications. Even though the extremum seeking controller is referred as one of the "early methods" (Ariyur et al. 2003, Dochain et al. 2011), its local and semi-global stability are proved by (Krstic et al 2000, Tan et al. 2009). Some of the industrial applications are (Guay et al. 2004, Dower et al. 2008, Brunton et al. 2010). After the stability of the extremum seeking controller is proved, there have been various control designs and many applications. Especially, switching or sliding-mode based extremum seeking controller (Pan et al. 2003, Oliveira et al. 2012, Chen et al. 2017), extremum seeking model predictive controller (Subbaraman et al. 2016), extremum seeking based PID tuning (Killingworth et al. 2006), multi-objective extremum seeking controller (Zhang et al. 2007, Guay et al. 2015, Ye et al. 2016), extremum seeking-like observer (Sassano et al. 2011) are known applications. In addition, stochastic extremum seeking optimization is introduced where its maximization/minimization performance is proved to be better than deterministic extremum seeking optimization (Liu et al. 2012). In order to improve the steady state-error and local performance of the extremum seeking control, modified versions are proposed in (Hazeleger et al. 2020, Zhao et al. 2020), respectively.

Based on the literature studies, the improvements on the performance of the extremum seeking control are mainly based on the assistance of the conventional methods and optimization-based parameter tuning. In this paper, to increase the tracking efficiency of the conventional extremum seeking controller, an adaptive extremum seeking based fault estimation and extremum seeking based fault tolerant controller are designed for linear and nonlinear systems with process faults. The estimated fault is forced as an additional input to the system to be compensated. In application part, the proposed fault tolerant controller design is applied to an experimental flexible joint manipulator with varying payloads. Both in numerical simulations and real-time applications, acceptable tracking and estimation results are provided for further applications. The sole extremum seeking controller and extremum seeking fault tolerant controller are numerically compared in root-mean squared tracking error (RMSE) sense under varying payload case.

2. EXTREMUM SEEKING OPTIMIZATION

Extremum seeking optimization scheme (Krstic et al 2000, Dochain et al. 2011) is shown in Figure 1 to optimize output cost function y . The theory behind the extremum seeking is given as follows. The cost function of the system is first passed from the wash-out filter which is a high-pass filter. Then, the filtered signal is modulated with a high-frequency sine signal. After that, the modulated signal is passed from a low pass filter. Finally, the parameter change is integrated and summed by the modulating signal then an optimized parameter is obtained. The resulting signal is a second-order gradient of the cost function with respect to its parameters.

Consider a single-input single-output (SISO) nonlinear state space system is

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u), \\ y &= g(x), \end{aligned} \tag{1}$$

where $x(t) \in R^n$ is state vector, $u(t) \in R$ is input and $y(t) \in R$ is output of the system. A smooth control signal $u = \alpha(x, \theta)$ is defined with an adaptable parameter, then the closed-system dynamics,

$$\dot{x} = f(x, \alpha(x, \theta)) \tag{2}$$

has an equilibrium with the parameter θ . The following assumptions can be made for the closed-loop system.

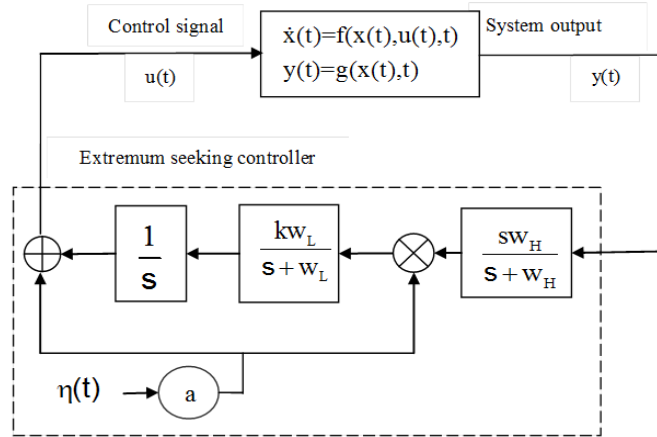


Figure 1. Extremum seeking controller scheme.

Assumption 1. There exists a smooth function $h: R \rightarrow R^n$ such that

$$f(x, \alpha(x, \theta)) = 0, \text{ if and only if } x = h(\theta) \tag{3}$$

Assumption 2. For each $\theta \in R$ the equilibrium $x = h(\theta)$ of the system (3) is locally exponentially stable.

Assumption 3. There exists a $\theta^* \in R$ such that

$$(goh)'(\theta^*) = 0$$

$$(goh)''(\theta^*) < 0 \tag{4}$$

Based on three assumptions and the feedback design seen in Figure 1, it is proved that $y = g(x)$ function has a maximum at $\theta = \theta^*$. Its stability analysis and convergence of control signal are shown (Pan et al. 2003). To get the minimum of y output cost function, it is replaced by $-y$. Using the extremum seeking control, the change of the parameter (Ariyur et al. 2003) is derived as

$$\dot{\hat{\theta}} = -ka \frac{1}{2} \frac{\partial^2 y}{\partial \theta^2} \hat{\theta} \tag{5}$$

where the by choosing the suitable parameters of the extremum seeking optimization, the parameter update can be obtained in real-time. In literature, nonlinear uncertain systems with disturbances are controlled with extremum seeking control. In (Dochain et al. 2011), an extended state observer-based regulator is designed, and conjugate gradient based extremum seeking is achieved. In (Lara et al. 2017), extremum seeking sliding-mode controller is designed for input-output linearized model with an uncertainty function.

3. STOCHASTIC EXTREMUM SEEKING FAULT TOLERANT CONTROL

In this paper, an extremum seeking optimization-based fault estimator and compensator is proposed. In fault estimation step, an approximate model of the system is utilized as a reference model. Then, the output estimation error is defined as $\hat{e} = \hat{y} - y$ where \hat{y} is the output of the reference model and y is the output of the real system. The output estimation error is minimized by an extremum seeking optimization such that the discrepancy between the system output and approximate model output is considered as the

fault of the system dynamics. In fault compensation step, the produced output of the extremum seeking estimator will be the fault variable which is used as an additional input function to minimize the estimation error of the system. The ideas for the construction of the approximate model are given above.

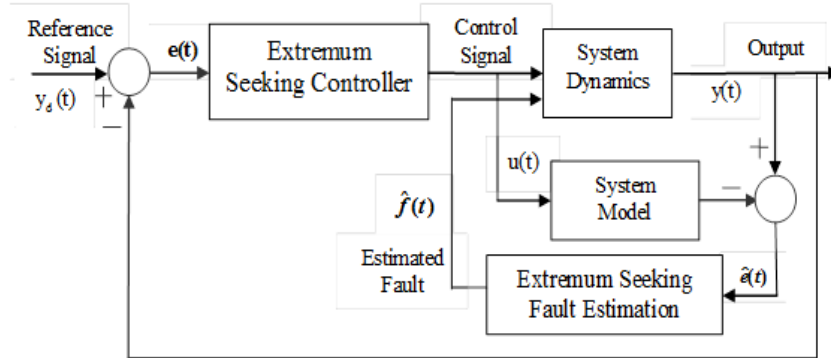


Figure 2. Fault tolerant controller scheme.

The proposed fault tolerant controller optimizes simultaneously the tracking error $e = y_d - y$ with respect to control parameter and the estimation error $\hat{e} = \hat{y} - y$ with respect to fault variable where \hat{y} is the approximate output of the system and y_d is the reference signal. It is assumed that \hat{y} is here a fault free output of the system. Like the control parameter update (5), the adaptive fault estimation is defined as

$$\hat{f}(t) = -\alpha\beta \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \hat{e}}{\partial f^2} \hat{f} \tag{6}$$

where α and β are design parameters. Note that the produced control signal and fault variable are applied to the system dynamics then the resulting output signal is obtained. Therefore, the optimized parameter must satisfy the system dynamics, which presents a constrained optimization. The proposed control scheme is shown in Figure 2.

4. APPROXIMATE MODELING OF FLEXIBLE-JOINT MANIPULATOR

The flexible joint manipulator consists of double integrator, but it has single input single output dynamics. The input is a control voltage applied to the first motor; the output is the angle position of the end-effector. Due to the spring behavior, it is difficult to position of the end effector when large payloads are loaded. It is produced by Quanser Inc. and compatible with MATLAB/SIMULINK environments. Therefore, it is a suitable system to test the designed observers and controllers. The flexible-joint manipulator is shown in Figure 3. Its mathematical dynamics has been already derived using Lagrange equations (Groves et al. 2004) such that its dynamics have weak nonlinear sine term. Therefore, the experimental set up is supplied by the manufacturer with a linearized model and an observer design (Quanser, 2012) of velocity estimations. In literature, observer and tip position measurement-based methods also exist (Talole et al. 2010, Beyhan 2016, Agee et al. 2014) to get accurate tracking results. In this study, for the purpose of extremum seeking based design, its physical model will not be used. The input voltage and output tip position are available to get an approximate model.

For the sake of simplicity, the approximate model of the system may be constructed in three ways. If the mathematical model of the physical system exists, then it can be used as an approximate model since the real-time working system has always different dynamics than known mathematical model.

- If there is no physical model and the input-output measurements are available, then the input-output data must be analyzed for appropriate model selection. If the system dynamics are linear or have mild nonlinear terms then using linear or nonlinear state-space subspace identification methods, a state space model can be constructed with optimization methods.

- Addition to the second item, if the system dynamics have time-delay, nonminimum phase dynamics or strong nonlinearities, then support-vector machine, neural-network, fuzzy system, orthogonal function networks and etc. can be used to model the system in appropriate forms.

The approximate model of the system is here modeled via a linear state-space model. It is constructed by a 4th-order model since it has double integrator of two cascaded mechanical systems. Its parameters are obtained by least-squares estimation as

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1.162 & -38.38 & -4.560 & -0.124 \end{bmatrix} 10^3$$

$$B = \begin{bmatrix} -3.94 \\ 487.89 \\ -427.01 \\ 323.71 \end{bmatrix} 10^3, \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T. \quad (7)$$

In order to utilize the state-space model in the closed-loop control and get accurate model, the continuous-time input-output data is collected from the real-time system with closed-loop dynamics. The modeling results are very accurate. To focus on the extremum seeking control they are not illustrated here. The above state-space model will be used as the approximate model of the system.

In the extremum seeking controller/estimator design, the high-frequency modulation signal is first designed as a sine or cosine signal with a phase shift. However, the high-frequency modulation signal has a constant frequency and phase therefore it is a deterministic signal. The constant frequency phase sine signal drives the parameter change to find the minimum/ maximum of cost function in very small near local point. Therefore, it is very difficult to find a proper frequency and phase value with other design parameters. In literature, this problem is solved by using a white noise driven sine signal. Therefore, the modulation signal has infinite variable high frequency with stochastic behavior. In fact, this kind of modulation signal excites all dynamics of the cost function change, then the parameter change might get rid of the local minimum/maximum points. Therefore, in this work, the extremum seeking based controller and estimator are designed with stochastic modulation signal.



Figure 3. Experimental set-up for flexible-joint manipulator.

Let us summarize the proposed methods. The followings are achieved in control process.

- Using input-output data of the system, a state-space model is constructed.

- Based on the state-space model, an extremum seeking controller is designed and applied to the real-time system.
- For disturbance and uncertainty case, an extremum seeking fault estimator is designed based on the state space model.
- Using the estimated fault with extremum seeking controller, a fault tolerant controller is designed. The estimated fault is used as an additional input of the system.

In this way, the fault tolerance can be performed without knowing the system model. In addition, the effect of unknown process faults and disturbances are compensated. Note that the fault estimator and controller have different designs. However, the filter parameters are designed same since the same experimental system is used. The gain of the integrator can be changed since in real-time in order to force the system to the desired dynamics. There is required relatively large gains in estimator design. The main difference comes from the objective functions. Controller minimizes the tracking error; estimator minimizes the estimation error.

The parameters of the estimator and controller can be found by using optimization methods, grid-search, or trial-and-error approach. In this study, the filter cut off frequencies $w_L = 1 \text{ rad/sec}$ and $w_H = 100 \text{ rad/sec}$ are initially designed both for extremum seeking estimator and controller. After that the gain constants k and a are tuned by a grid-search from a reasonable interval. Then, the most suitable parameters are found as $a = 0.01$ and $k = 450$ for the extremum seeking controller and $\alpha = 0.01$ and $\beta = 1200$ for the extremum seeking estimator, respectively. The designed fault tolerant controller is applied to the robot manipulator with same scenario both in numerical simulation and real-time application. The period is selected $T = 100$ [seconds] where the sampling period is $T_s = 2 \times 10^{-3}$ [seconds] with Runge-Kutta integration routine. The controller and fault-estimator begin the process instantaneously, then a large constant fault, that is in fact a handling a heavy payload, is applied to the system between 30th and 60th seconds.

5. NUMERICAL SIMULATIONS

In simulation study, we can apply the fault as an additional input of the state space model. Therefore, the fault estimator estimates the fault numerically exact value then its effect is compensated by the extremum seeking controller. In Figure 4 tracking results are shown. Figure 4(a) shows sine signal tracking, and the resulting tracking error is given in Figure 4(b). The main subject of the method is the applied control signal which is seen in Figure 4(c). The corresponding variation of the input signal which is the right before the integrator is presented in Figure 4(d).

In Figure 5 extremum seeking optimization-based estimation results are shown. Based on the estimated fault the difference between the estimated output and the system output are shown in Figure 5(a). The corresponding estimation error which is an extremum seeking optimization error is given in Figure 5(b). The estimated fault shown in Figure 5(c) is very accurate result. The effect of the fault signal is seen in the applied control signal. Due to the fault compensation its effect is very less on the tracking result. For the extremum seeking estimator, in order to excite all dynamics, the applied dither signal is illustrated in Figure 5(d). It is a white noise which has very aggressive change. Later, the deterministic and stochastic modulation-based fault tolerant control comparison will be given. In addition, the shape of the fault is not important the fault estimation error can converge to the zero very fast. The constant large value is applied since a large payload will be attached to the manipulator end-effector in real time.

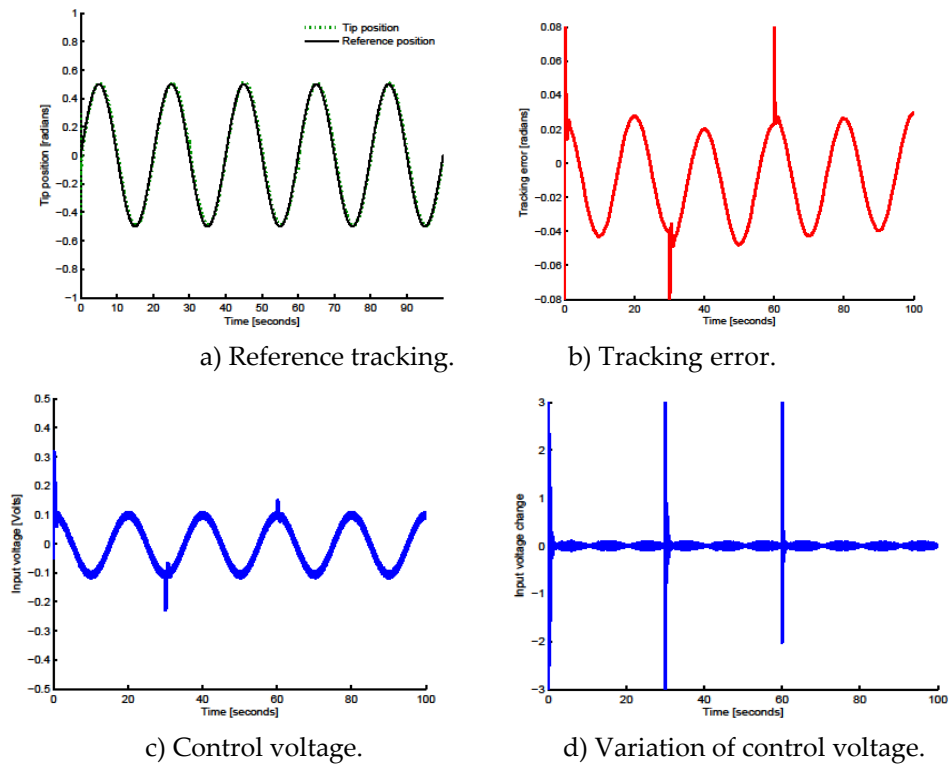


Figure 4. Simulation Study: ESC based fault tolerant control of manipulator. An artificial constant fault is applied between 30th and 60th seconds.

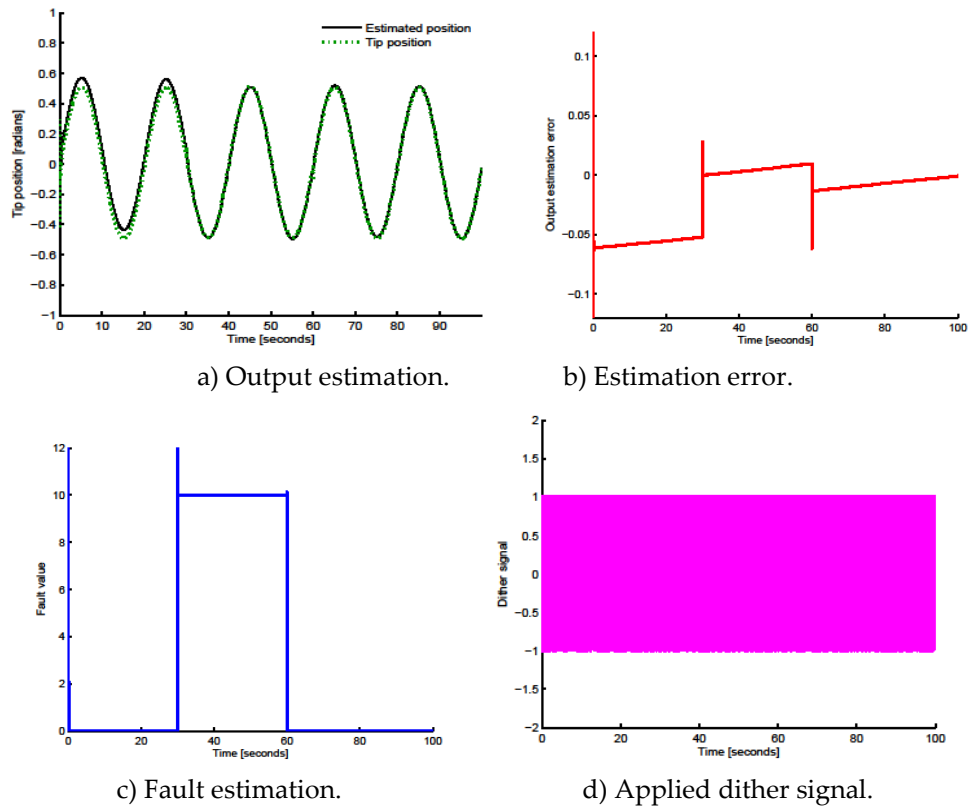


Figure 5. Simulation Study: ESO based fault estimation results. An artificial constant fault is applied between 30th and 60th seconds.

This result exhibits the main contribution of the proposed idea. As expectedly, the numerical simulation results are very accurate due to the well-defined dynamics without any noise or disturbance and the performance of the proposed fault tolerant controller.

6. EXPERIMENTAL RESULTS

In real-time experiments, we cannot introduce an additional input to the system except applied control voltage. Therefore, the effect of the time-varying payload will be compensated by the recovered input voltage. In other words, the fault tolerance is performed that the estimated fault is compensated by adding to the input voltage. In fact, this constraint brings an advantage of the proposed fault tolerant controller since there exist another fault such as unmodeled dynamics or noises. In the figures, the effect of unknown and estimated faults except additional payload can be observed. As the same scenario, an additional large payload is applied to the system between the 30th and 60th seconds.

Real-time control results are shown in Figure 6. The tip position of the end-effector and the reference signals are plotted in Figure 6(a). The corresponding tracking error is shown in Figure 6(b). The applied control signal and its variation which generated by the extremum seeking controller is presented in Figure 6(c) and Figure 6(d), respectively. Real-time extremum seeking based estimation results are illustrated in Figure 7. The system output tip position and estimated tip position are shown in Figure 7(a). The output estimation error which is between the approximate system model and the system output is plotted in in Figure 7(b). The estimated fault which decreases both the output estimation error and tracking error is given in Figure 7(c). Finally, the real-time applied high frequency in fact infinite frequency white noise signal is presented in Figure 7(d). In the application results, it is seen that there exists always a fault value which can be discrepancy between the system and approximate model. However, the effect of the applied additional payload fault is clearly seen in the dynamics. As explained above, by the fault compensation, the applied control signal varied between the 30th and 60th seconds.

Remember that the extremum seeking is not based on the system model, therefore the effect of the varying payload can be compensated by utilizing the sole extremum seeking controller. Therefore, the extremum seeking controller is applied to the system without fault compensation and the tracking error RMSE is given in Table 1. The advantage of the fault estimation and tolerance is effectively seen from the numerical results.

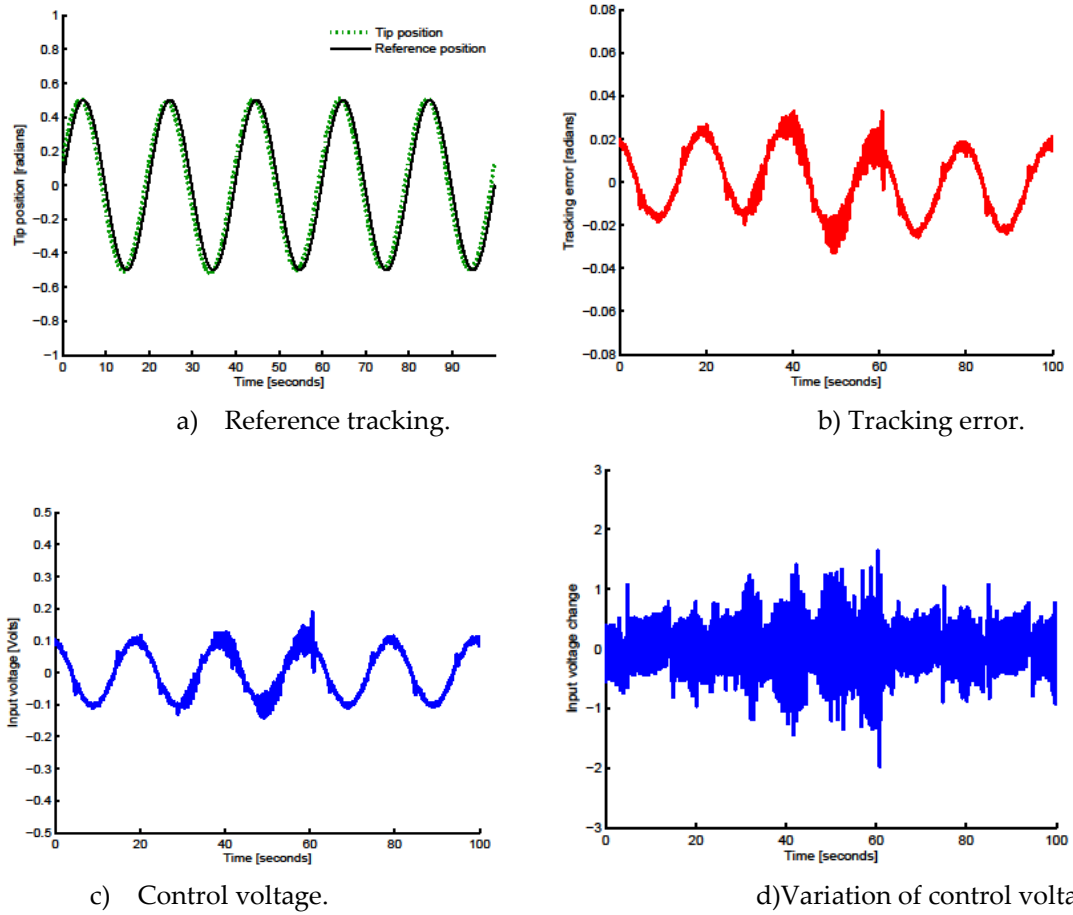


Figure 6. Experiment: ESC based fault tolerant control of manipulator. An additional payload is applied between 30th and 60th seconds.

Table 1. Performances of the real-time applications.

Method/RMSE	Tracking	Estimation
ESC without fault tolerance	0.0373	do not exist
ESC with fault estimation	0.0252	0.0223

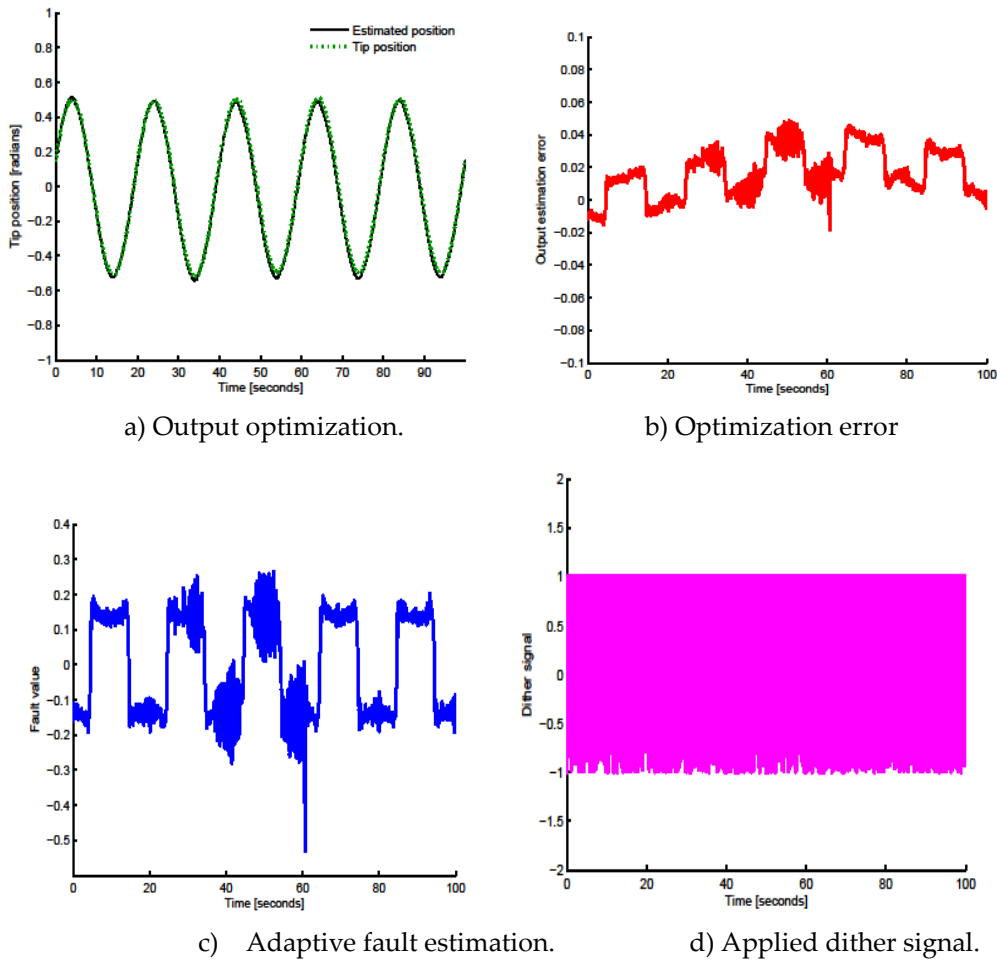


Figure 7. Experiment: ESO based estimation results. An additional payload is applied between 30th and 60th seconds.

7. CONCLUSION

In this paper, extremum seeking based adaptive fault estimation and output feedback controller are designed and experiments are conducted on the experimental flexible joint manipulator. An unknown fault is adaptively estimated using extremum seeking optimization to minimize the estimation error between the real-system and an approximate model of the system. The advantage of the extremum seeking based fault estimation is to estimate the any fault in system dynamics that causes a change in system output. Then, using estimated fault in the closed-loop control, better tracking results are obtained. The designed fault tolerant controller can be successfully used for also highly nonlinear systems when an accurate system model exists. The accurate system model can be constructed using one of the successful system identification techniques since the controller and estimator are designed based on the system identification model. In general, for these kind of unknown systems with uncertainties are usually controlled using adaptive controllers. However, determination of initial parameters, tuning the parameters and parameter drift problems are main deficiencies of the adaptive control. For the proposed configuration, these are not the problems. But, the accuracy of the identification model and determination of the extremum seeking parameters are the main design problems. But in the control process, the designed fault estimation model estimates also the unmodeled dynamics of the system. Therefore, the estimation and control results based on the real-time experiments show the applicability of the proposed configuration.





REFERENCES

- Agee J. T., Z. Bingül, and S. Kizir, Tip trajectory control of a flexible link manipulator using an intelligent proportional integral controller," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 36, no. 5, pp.673-682, 2014.
- Ariyur, K. B. and M. Krstic, *Real Time Optimization by Extremum Seeking Control*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- Astrom K. J. and B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1994.
- Beyhan S., Adaptive fuzzy terminal sliding-mode observer with experimental applications," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 585- 594, 2016.
- Brunton S. L., C. W. Rowley, S. R. Kulkarni, and C. Clarkson, Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 10, pp. 2531-2540, Oct 2010.
- Chen S., L.Wang, K. Ma, and H. Zhao, A switching-based extremum seeking control scheme," *International Journal of Control*, vol. 0, no. 0, pp. 1-15, 2017.
- Dochain D., M. Perrier, and M. Guay, Extremum seeking control and its application to process and reaction systems: A survey," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 82, no. 3, pp. 369-380, 2011.
- Dower P. M., P. M. Farrell, and D. Nesic, Extremum seeking control of cascaded raman optical amplifiers," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 396{407, May 2008.
- Groves K. and A. Serrani, Modeling and nonlinear control of a single link exible joint manipulator, Ohio State Univ., 2004.
- Guay M. and D. Dochain, A multi-objective extremum-seeking controller design technique," *International Journal of Control*, vol. 88, no. 1, pp. 38-53, 2015.
- Guay M., D. Dochain, and M. Perrier, Adaptive extremum seeking control of continuous stirred tank bioreactors with unknown growth kinetics," *Automatica*, vol. 40, no. 5, pp. 881-888, 2004.
- Hazeleger, Leroy, Mark Haring, and Nathan van de Wouw. "Extremum-seeking control for optimization of time-varying steady-state responses of nonlinear systems." *Automatica* 119 (2020): 109068.
- Killingsworth N. J. and M. Krstic, PID tuning using extremum seeking: online, model-free performance optimization," *IEEE Control Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 70-79, Feb 2006.
- Krstic M. and H.-H. Wang, Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems," *Automatica*, vol. 36, no. 4, pp. 595-601, 2000.
- Lara G. -Cisneros, R. Femat, and D. Dochain, Robust sliding mode-based extremum-seeking controller for reaction systems via uncertainty estimation approach," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2017, doi:10.1002/rnc.3736.
- Liu S.-J. and M. Krstic, *Stochastic Averaging and Stochastic Extremum Seeking*. Springer London, 2012.
- Noura H., D. Theilliol, J.-C. Ponsart, and A. Chamseddine, *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*, ser. Series: Advances in Industrial Control. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, Aug.2009.
- Oliveira T. R., A. J. Peixoto, and L. Hsu, Global real-time optimization by output-feedback extremum-seeking control with sliding modes," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 349, no. 4, pp. 1397-1415, 2012, special Issue on Optimal Sliding Mode Algorithms for Dynamic Systems.
- Pan Y., U. Ozguner, and T. Acarman, Stability and performance improvement of extremum seeking control with sliding mode," *International Journal of Control*, vol. 76, no. 9-10, pp. 968-985, 2003.
- Quanser Inc., Canada, *Rotary Flexible Joint User Manual*, 2012.
- Sassano M., D. Carnevale, and A. Astol, Extremum seeking-like observer for nonlinear systems," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 1849-1854, 2011.
- Spooner J., M. Maggiero, R. Ordenez, and K. M. Passino, *Stable Adaptive Control and Estimation for Nonlinear Systems: Neural and Fuzzy Approximator Techniques*. John Wiley & Sons, 2002.

- Subbaraman A. and M. Benosman, Extremum seeking-based iterative learning model predictive control" IFAC-Papers OnLine, vol. 49, no. 13, pp. 193-198, 2016.
- Talole S. E., J. P. Kolhe, and S. B. Phadke, Extended-state-observer based control of flexible-joint system with experimental validation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 4, pp. 1411-1419, April 2010.
- Tan Y., D. Nesić, I. Mareels, and A. Astol, On global extremum seeking in the presence of local extrema," Automatica, vol. 45, no. 1, pp. 245 -251, 2009.
- Ye M. and G. Hu, A robust extremum seeking scheme for dynamic systems with uncertainties and disturbances," Automatica, vol. 66, no. C, pp. 172-178, Apr. 2016.
- Zhang C. and R. Ordonez, Numerical optimization-based extremum seeking control with application to abs design," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 52, no. 3, pp. 454-467, March 2007.
- Zhao, Zhongfan, et al. "Local self-optimizing control based on extremum seeking control." Control Engineering Practice 99 (2020): 104394.



SU KAYIP YÖNETİMİNDE İZOLE BÖLGE TASARIMI VE AKTİF KAÇAK KONTROLÜNÜN EKONOMİK ANALİZLERİ İÇİN HESAPLAMA ARACININ GELİŞTİRİLMESİ

¹Salih YILMAZ , ²Mahmut FIRAT , ³Özgür ÖZDEMİR , ⁴Abdullah ATEŞ 

¹Malatya Su ve Kanalizasyon İdaresi, Malatya, TÜRKİYE

²İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

³Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi, Kayseri, TÜRKİYE

⁴İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

¹salihyilmaz@maski.gov.tr ²mahmut.firat@inonu.edu.tr, ³ozgurozdemir@kaski.gov.tr,

⁴abdullah.ates@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 16.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.02.2021)

ÖZ: Dağıtım sistemlerinde meydana gelen sızıntıların önemli teknik, sosyal ve ekonomik etkileri olmaktadır. Bu etkilerin azaltılması için, uygunluk, uygulanabilirlik ve ekonomik ölçütler esas alınarak en uygun önleme yöntemlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, sürdürülebilir su kayıp yönetiminin sağlanması amacıyla, izole ölçüm bölgeleri ve aktif kaçak kontrolü yöntemleri için, ekonomik analiz yapısının oluşturulması ve bu analizlerin sistematik ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için hesaplama aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. İzole bölgeler için, gerekli bölge ve izolasyon vana sayısı, saha çalışmaları gibi bileşenlerin maliyet analizleri gerçekleştirilmektedir. Aktif kaçak kontrolü ekonomik analiz yapısında, sızıntı yerinin tespit edilmesi, onarılması ve izlenmesi faaliyetleri yer almaktadır. Bu analizlerin sistematik ve doğru bir şekilde yapılması için web tabanlı bir hesaplama aracı geliştirilmiştir. Bu hesaplama aracı ile pilot veri seti için analiz yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Geliştirilen bu ekonomik analiz modelinin ve hesaplama aracının sızıntı yönetiminin temel yöntemleri için ekonomik değerlendirme açısından referans oluşturacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Su kayıp yönetimi, İzole bölge, Aktif kaçak kontrolü, Ekonomik analiz, Hesaplama aracı

Development of Calculation Tools for Economic Analysis Active Leakage Control and District Metered Area Methods Applied in Water Loss Management

ABSTRACT: Leaks occurring in distribution systems have important technical, social and economic impacts. In order to reduce these impacts, the most appropriate prevention methods should be selected based on suitability, applicability and economic criteria. In this study, it is aimed to develop an economic analysis structure for isolated measurement zones and active leakage control methods in order to ensure sustainable water loss management and to develop a calculation tool to perform these analyzes systematically and accurately. Cost analysis of components such as required zone and number of isolation valves, field studies are performed for isolated zones. The economic analysis structure of the active leakage control includes the detection, repair and monitoring of the leak location. A web-based calculation tool has been developed to make these analyzes systematically and accurately. With this calculation tool, analysis was made for the pilot data set and the results were discussed. It is thought that this economic analysis model and calculation tool developed will constitute a reference for the basic methods of leakage management in terms of economic evaluation.

Key Words: Water loss management, District metered area, Active leakage control, Economic analysis, analysis tool

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dağıtım sistemlerinde yüzeye çıkmayan sızıntıların yönetilmesinde Aktif Kaçak Kontrolü (AKK) yaklaşımı kullanılmaktadır. AKK, sızıntının farkına varılması, yerinin tespiti, onarılması, izlenmesi ve kontrol edilmesi çalışmalarını kapsamaktadır. Bu yöntemin temelini ise Ölçülebilir izole Alt Bölge (ÖAB) tasarımı ve sahada uygulanması oluşturmaktadır. İzole bölgenin sınırları diğer şebekelerden izole edildiği için, sistemin izlenmesi, kontrol edilmesi, sızıntıların yönetilmesi ve önlenmesi büyük dağıtım sistemlerine göre daha avantajlı ve kolay olmaktadır. Literatürde AKK ve ÖAB yaklaşımlarının sızıntı yönetiminde uygulandığı görülmekte ve yöntemlerin uygulanmasında ekonomik değerlendirmelerin yapılması gerektiği vurgulanmaktadır (Lambert ve diğ., 1999; Puust ve diğ., 2010; Nazif ve diğ., 2010; Sarrate ve diğ., 2014; Candelieri ve diğ., 2015; Berardi ve diğ., 2016; Campbell ve diğ., 2016; Cabral ve diğ., 2019; Lipiwattanakarn ve diğ., 2019). Farley ve Liemberger (2005) geliştirmekte olan ülkelerin mevcut sistemlerinin, gelişmiş ülkelere nazaran teknolojik ve sistem olarak (fiziki özelliklerinin, arıza yoğunluklarının, arızaya üzerindeki etkili faktörlerin) daha zayıf olduğunu vurgulamış ve buna bağlı olarak gerekli kayıp azaltma yöntemlerinin sistemlere özel olarak geliştirilmesi gerektiğini ifade etmiştir. Xin ve diğ. (2014), sızıntıların tespit edilmesinde uygulanan yöntemleri incelemiş, avantajları, dezavantajları ve maliyetlerini değerlendirmiştir. Yer mikrofonlarının, denetim aralığının 200-500 m, doğruluk yüzdesinin düşük, verimliliğinin personel tecrübesine bağlı olduğu ve işletme maliyetinin düşük olduğu belirtilmiştir. Buna karşılık bölgesel kaydedici ve korelatör ekipmanlarının, tarama aralığının 2000 m'ye kadar olduğu, yüksek doğrulukla otomatik tespit edebildiği ve ekipmanların yüksek maliyetli olduğu ifade edilmiştir.

Fontanazza ve diğ. (2015) konutlarda kullanılan sayaçların bozulmalarına sebep olan faktörlerin araştırılması amacıyla, sayaç yaşı ile konutlardaki su depolarını dikkate alarak deneysel ve teorik analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, ayrıca, sayaç yaşı, sistem basıncı, kullanıcı davranışı gibi faktörlerin İdari kayıplar üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, idari kayıpların karmaşıklığının abonelerin su kullanımı ve İdarenin gelir kaybı üzerinde önemli etkileri olduğu belirtilmiştir. Ferrari ve Savic (2015) dağıtım sistemlerinde izole bölgelerin planlanması ve uygulanması için, izole bölgeden beklenen faydaların (sızıntının ve arızanın azaltılması, enerji ve su tüketiminin azaltılması ve verimliliği) ekonomik açıdan analiz edilmesi ve detaylı değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Çalışmada, izole bölge için performans analizi gerçekleştirilmiş ve basınca duyarlı talep azalması, arıza sıklığı ve sızıntı azaltma kapsamında önemli ekonomik faydalar sağladığı ifade edilmiştir. Ayrıca izole bölge yönteminden elde edilecek faydaların, izole bölge sayısına, izolasyonda kullanılan izolasyon vana sayısına bağlı olduğu ve bu nedenle de izole bölge sayısını belirlemek için detaylı analiz yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çalışma sonucunda su yönetiminde ÖAB için maliyetlerin ve faydaların analizinin yapılması ve ekonomik performans değerlendirme çerçevesinin oluşturulması, farklı ÖAB düzenleri için karşılaştırma yapılması ve farklı seçenekler arasında en iyi çözümün tanımlanması sağlanmıştır Benzer şekilde, di Nardo ve diğ. (2017), dağıtım sisteminde izole bölge planlanması ve tasarımının oldukça karmaşık yapıya sahip olduğu, hidrolik, ekonomik ve topolojik açıdan sistemin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu amaçla, planlanan izole bölgelerin sınırlarının ve hidrolik parametrelerin ölçümü için kullanılacak cihazların yerlerinin belirlenmesinde ekonomik ve enerji bileşenlerini dikkate alan bir algoritma geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda mümkün olan en az debimetreyi kullanan, su bütçesi hesaplamayı kolaylaştıran, hidrolik performansı koruyan ve işletme maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlayan bir algoritma önerilmiştir. Lipiwattanakarn ve diğ. (2019) sızıntıların önlenmesi ve azaltılmasının enerji ve sistem işletme maliyeti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Uygulama alanında izole bölgede sızıntıların onarılmasından sonra izole bölge giriş debisinin % 9 azaldığını buna bağlı olarak sistem giriş enerjisinde ise % 8 azalma tespit edildiği, AKK uygulanmasıyla sistem verimliliğinin iyileştiği vurgulanmıştır.

Su kayıp önleme yöntemlerinin uygulanmasında, personel, teknik altyapı, veri ölçümü ve izlenmesi için cihaz ve izleme sistemleri, saha çalışmaları için cihaz gibi birçok bileşen maliyet ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, yöntemlerin uygunluğu, uygulanabilirliği, teknik alt yapının mevcut durumu, maliyetlerin ve faydaların hesaplanması ve fayda maliyet analiz modelinin oluşturulması gerekir. Bu çalışmada, sızıntı

yönetiminde uygulanan ÖAB ve AKK yöntemleri için, ekonomik analiz yapısının oluşturulması ve bu analizlerin sistematik ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için hesaplama aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece, karar vericiler ve uygulayıcılar için, maliyet oluşturan tüm bileşenlerin dikkate alındığı ve analizlerin belirli bir standartta yapıldığı bir model ortaya konulmuş olacaktır.

SU KAYIPLARI VE EKONOMİK ETKİSİ (WATER LOSSES AND ECONOMIC IMPACTS)

Dağıtım sistemlerinde meydana gelen kayıplar, fiziki kayıplar ve idari kayıplar şeklinde sınıflandırılmaktadır. Fiziki kayıplar; kaynaktan aboneye kadar tüm aşamalarda (iletim hattı, dağıtım sistemi, servis bağlantıları) oluşan sızıntıları içerirken, idari kayıplar; sayaç hatalarından ve kaçak kullanımlardan kaynaklanan kayıplardır (Lambert ve diğ., 1999; Lambert ve diğ., 2014; Farley ve diğ., 2008). Su kayıplarının en önemli bileşenini oluşturan fiziki kayıplar (Farley ve diğ., 2008), arıza bakım onarımların artması, işletme koşullarının bozulması, kesintili su iletimi gibi önemli teknik etkilere sahiptir. Ayrıca, fiziki kayıpların yüksek olduğu sistemlerde, onarım maliyetleri, sızıntıdan dolayı satılmayan suyun maliyeti, su üretim ve sistem işletme maliyetleri, sızıntı önleme yöntemlerinin uygulanmasında ekipman, personel, işletme ve bakım maliyetleri gibi önemli ekonomik etkiler meydana gelmektedir. Diğer taraftan, hizmet kalitesinin düşmesi, abone şikayetlerinin artması ve su kesintilerinin artması şeklinde sosyal olumsuz etkiler gözlenmektedir (May, 1994; Farley ve Trow, 2003; Lambert ve Lalonde, 2005; Pearson ve Trow, 2005). Su kayıplarının yönetilmesinde uygulanan en etkili yol olan AKK stratejisi, ÖAB tasarımı, debi ve basınç analizi, arıza onarım hızı ve kalitesinin iyileştirilmesi, abone yönetimi, sızıntı yeri tespiti için ekip oluşturma ve boru malzemesi yönetimi gibi yöntemleri içermektedir (Lambert ve Lalonde, 2005; Pearson ve Trow, 2005; Farley ve diğ., 2008; Islam ve Babel, 2013; Cabral ve diğ., 2019). Bu yöntemler birçok durumda zaman alıcı ve maliyetli olduğu için uygulanmadan önce, mevcut teknik, ekonomik, personel ve veri ölçümü açısından yeterli alt yapının olması gerekmektedir. Ayrıca, uygulanacak yöntemin uygun ve uygulanabilir olması, maliyet standardının tanımlanması ve analiz edilmesi, faydaların analiz edilmesi ve fayda/maliyet analizinin yapılması sürdürülebilir kayıp yönetimi açısından oldukça önemlidir. İlerleyen bölümlerde su kayıp yönetiminde uygulanan temel bileşenler için ekonomik analiz standardı ve esasları detaylandırılmış ve bu analizler için geliştirilen hesaplama aracı örneklendirilmiştir.

EKONOMİK ANALİZ MODELİNİN VE HESAPLAMA ARACININ GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF ECONOMIC ANALYSIS MODEL AND CALCULATION TOOL)

Su kayıplarının önlenmesi amacıyla, izole bölgelerin oluşturulması, minimum gece debisi analizi, akustik yöntemlerle sızıntı yerinin belirlenmesi, basınç kontrolü, boru malzemesi yönetimi ve arıza onarım hız ve kalitesinin iyileştirilmesi gibi birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler, şebeke ve abone bilgileri, vana yerleri, servis bağlantı detayları, yeterli teknik ve teknolojik alt yapı, personel ve ekonomik gibi çok farklı gereksinimlere ihtiyaç duymaktadır. Ancak sistemin mevcut koşulları dikkate alınmadan bu yöntemlerin uygulanması ekonomik olmayan sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Sürdürülebilir su kayıp yönetimi için, su kayıplarının azaltılabileceği teknik ve ekonomik seviye belirlenmeli, bu seviyelere ulaşmak için sistemin mevcut durumuna uygun ve fayda/maliyet analizi ile uygulanabilirliği ortaya konulmuş en uygun yöntemler kullanılmalıdır. Bu kadar detaylı analizlerin yapılabilmesi için, tüm değişkenleri göz önünde bulunduran, fayda-maliyet standardını ortaya koyan, referans bilgi üreten ve sistematik ve doğru analiz gerçekleştiren hesaplama araçlarının kullanılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, su kayıp yöntemlerine ait sistematik maliyet analizleri için “su kayıp yönetimi ekonomik analiz hesaplama aracı” geliştirilmiştir. Bu hesaplama aracında birbiri ile bütünleşik çalışan modüller temel olarak; ÖAB maliyet analizi ve AKK maliyet analizi şeklindedir. Modüllerde yer alan ortak veriler “veri girişi ekranında” bir defa girilmekte (Şekil 1) ve tüm modül sayfalarına otomatik olarak aktarılmaktadır. Ayrıca, her bir modül için gerekli olan özel veriler ilgili modül sayfasında kullanıcı tarafından girilebilmektedir. Bu hesaplama modüllerinde değişkenlere ait birim maliyetler, Kayseri KASKİ ve Malatya MASKİ sahalarında yapılan çalışmalar, analizler esas alınarak ve 2020 yılı birim fiyatları dikkate

alınarak belirlenmiş ve sisteme tanımlanmıştır. Ancak bu birim fiyatların kullanıcı tarafından değiştirilmesi ve yeni değer girilmesi de mümkün olmaktadır.

Değişken Adı	Açıklama	Değer	Birim
Ölçülen Minimum Gece Debisi	MNF analiz #55 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	l/s
Ortalama Sistem Basıncı (P ilk)	MNF analiz #21 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m
Şebeke Anahat Uzunluğu (Lm)	ILI analiz #9 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	km
Bölgede Kaydedilen Yıllık Şebeke Arıza Sayısı	PI analiz #34 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Fiziksel Kayıp Miktarı	Su dengesi hesaplanmış ise 'Fiziki Kayıplar (m3)' değeri alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m3
Yıllık Kaçınılmayan Fiziki Kayıp Hacmi (UARL)	ILI analizinde hesaplanan UARL değeri alınmalıdır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	l/gün
Bölgede Kaydedilen Yıllık Abone Arıza Sayısı	PI analiz #35 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Birim Su Üretim Maliyeti	PI analiz #45 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	TL/m3
Bölgede kaydedilen Yıllık Toplam Rapor Edilen Arıza Sayısı	PI analiz #36 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Toplam Abone Sayısı	ILI analiz #4 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	adet
Faturalandırılmış Ölçülmüş Yasal Tüketim	Su dengesi hesaplanmış ise 'Faturalandırılmış Ölçülmüş Yasal Tüketim (m3)' değeri alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	m3
Suyun Birim m3 için Satış Bedeli	PI analiz #56 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	<input type="text" value="0"/>	TL / m3

Şekil 1. Ekonomik analiz hesaplama aracı veri giriş ekranı

Figure 1. Economic analysis tool data entry

Ölçülen minimum gece debisi, izole bölge girişinde tüketimin en düşük olduğu gece saatlerinde (genelde gece 02:00-04:00 arasında) debimetreden okunan değeri temsil etmektedir. Bu saatte tüketim en düşük seviyede olduğu için sızıntıların farkına varılması daha kolay olmaktadır. Ortalama sistem basıncı, bölgede düzenli olarak ölçülen işletme basıncının ortalamasını ifade etmektedir. Şebeke ana hat uzunluğu, sistemin büyüklüğünü tanımlamada ve izole bölge büyüklüğü belirlemede kullanılan en temel verilerden birisi olarak gösterilir. Bu parametrenin doğru bir şekilde belirlenmesi için coğrafi bilgi sistemleri veri tabanının güncel olması esastır. Şebekede kaydedilen arıza sayısı, yüzeye çıkan ve çağrı merkezine bildirilen ve onarılan arızaları kapsamaktadır. Fiziki kayıp miktarı, bölgede standart su dengesi aracılığıyla belirlenen sızıntı hacmini ifade etmektedir. Yıllık kaçınılmaz fiziki kayıp hacmi, bir dağıtım sisteminde mevcut şebeke, servis bağlantı ve işletme basıncına göre teknik olarak meydana gelebilecek en düşük sızıntı miktarını göstermektedir. Bu parametre Uluslararası Su Birliği (IWA) tarafından önerilen denklemle belirlenmektedir. Servis bağlantı arıza sayısı, servis bağlantılarında meydana gelen yüzeye çıkan ve çağrı merkezine bildirilen ve onarılan arızaları kapsamaktadır. Birim su üretim maliyeti, bölgede yıllık olarak üretilen su hacmi için harcanan toplam miktarın su hacmine oranını göstermektedir. Bu parametre özellikle sistem işletme verimliliği ve fatura bedellerinin belirlenmesinde dikkate alınmaktadır. Bölgede kaydedilen servis bağlantı ve şebeke arıza sayılarının toplamı, bölgedeki toplam rapor edilen arıza sayısını vermektedir. Toplam abone sayısı, bölgede yasal olarak kayıtlı ve abone yönetim sisteminde güncel olarak abone sayılarının toplamını ifade etmektedir. Bu yasal kayıtlı aboneler tarafından tüketilen ve faturalandırılan hacim, yasal faturalandırılmış hacim olarak tanımlanır. Son olarak birim su satış bedeli, abonelerden birim m³ su tüketimi için alınan bedeli temsil etmektedir.

İZOLE BÖLGE TASARIMI İÇİN EKONOMİK ANALİZ MODÜLÜ (ANALYSIS MODULE FOR DMA)

ÖAB, sınırları tanımlanmış, diğer bölgelerden ayrılmış ve bileşenleri kendi içinde değerlendirilen bir sistem olarak tanımlanır (Farley ve diğ., 2008). Bir ÖAB’de, abone sayısı, şebeke uzunluğu, servis bağlantı sayısı gibi sistem parametrelerinin sayısı daha az olduğu için büyük sistemlere göre daha kolay kontrol edilebilir ve yönetilebilir bir sistem sunulmaktadır. Ayrıca, minimum gece debisi analizi, sızıntı yönetimi, debi basınç analizi ve basınç yönetimi gibi yöntemlerin uygulanmasında önemli katkı sağlamaktadır (Fallis ve diğ., 2011; Gomes ve diğ., 2013). Ancak, bölgenin planlanması, saha imalatları, ekipman ve otomasyon sistem maliyeti, sıfır basınç testi, izolasyon vanalarının tespiti ve izole edilmesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) veri güncelleme maliyetleri oluşmaktadır. Bu maliyetlerin en aza indirilmesi için bölgenin çok küçük olmaması gerekirken, sistemin kontrol edilebilir olması açısından da büyük planlanmaması önemlidir. ÖAB tasarımında bu analizlerin sürdürülebilir ve sistematik yapılabilmesi için tüm bileşenlerin dikkate alınması, maliyetlerin doğru bir şekilde hesaplanması ve büyüklüğünün uygun seçilmesi gerekir. Bu çalışmada, ÖAB tasarım bileşenlerinin ekonomik analiz standardının tanımlanması, sistematik bir şekilde yapılması için “izole bölge ekonomik analiz hesaplama modülü” geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu modülde ÖAB bilgileri (sayı, uzunluk, vana bilgileri, debimetre ve saha çalışmaları) ve şebeke bilgileri Şekil 2’deki gibi sisteme tanımlanmaktadır. Şekilde verilen pilot veri seti geliştirilen modelin test edilmesi ve hesaplama aracının sonuçlarının sunulması amacıyla dikkate alınmıştır. Bu sistemde toplam şebeke uzunluğunun 60 km olduğu düşünülmüştür. Bu şebekede toplamda 4 izole bölge planlanmış (ortalama uzunluk 15 km olacak şekilde) ve buna göre maliyet analizi yapılmıştır. Bu pilot şebeke için ayrıca analizlerde kullanılmak ve değerlendirme yapmak amacıyla arıza, su üretim ve satış bedelleri için veriler üretilmiştir.

Şebeke ve DMA Bilgilerinin Tanımlanması	Açıklama	Değer	Birim
Şebeke Anahat Uzunluğu (Lm)	ILI analiz #9 verisi girilmişse ilgili değer (x1000) katı alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	60,000.00	m
Ortalama DMA Uzunluğu	DMA tasarımında hat uzunluğunun ortalama olarak 15.000 m olabileceği vurgulanmıştır (Farley vd., 2008)	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 15000	m
Gerekli Minimum DMA Sayısı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	4.00	adet
Mevcut DMA Sayısı	Şebekede mevcut DMA olması durumunda girilecektir.	0	adet
İhtiyaç olan DMA Sayısı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	4.00	adet
Belirlenmesi Gereken Sınır Vanası Sayısı	Her DMA için 4 adet sınır vanasına ihtiyaç duyulduğu varsayılmıştır.	16.00	adet /1 DMA
İhtiyaç Olan Debimetre Odası Sayısı	Her DMA için 1 adet ihtiyaç duyulduğu varsayılmıştır.	4.00	adet /1 DMA
İhtiyaç Olan Sıfır Basınç Testi Sayısı	Her DMA için 2 adet ihtiyaç duyulduğu varsayılmıştır.	8.00	adet /1 DMA
İzleme, İşletme ve Altyapı Kurulumu	Her DMA için 1 adet ihtiyaç duyulduğu varsayılmıştır.	4.00	adet /1 DMA

Şekil 2. ÖAB Ekonomik analiz modülünde şebeke ve ÖAB bilgilerinin tanımlanması

Figure 2. Defining network and DMA information in DMA Economic analysis module

Şekil 2’de, ortalama izole bölge (ÖAB) uzunluğu, izole bölgeler oluşturulurken literatürde önerilen standart değeri (15 km) temsil etmekte olup kullanıcı bu değeri değiştirebilmektedir. Gerekli minimum ÖAB sayısı, şebeke toplam uzunluğu (km) ve ortalama ÖAB uzunluğunun oranına göre elde edilmektedir. Eğer sistemde hali hazırda izole bölge var ise bu değer mevcut ÖAB sayısı olarak tanımlanmaktadır. Bölgedeki toplam şebeke uzunluğu esas alınarak bölge için ihtiyaç duyulan ÖAB sayısı hesaplanmaktadır. Belirlenmesi gereken sınır vana sayısı, her bir ÖAB için 4 vana olacak şekilde hesaplanan bir parametre olup, bölgenin diğer bölgelerden izole edilmesi için sahada kapatılması gereken izolasyon vana sayısını ifade etmektedir. İhtiyaç duyulan debimetre sayısı, giriş debi değişiminin ölçülmesi amacıyla her bir ÖAB

için 1 adet ihtiyaç olduğu kabul edilerek belirlenen bir parametredir. İhtiyaç duyulan sıfır basınç testi sayısı, sistemin izole edilip edilmediğinin sahada testini amaçlayan bu parametre her bir ÖAB için 2 olacak şekilde belirlenmektedir. İzleme, işletme ve alt yapı kurulumu, sistemde ölçülen debi ve basınç gibi işletme verilerinin izlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla kullanılan sistemi ifade etmekte ve her bir ÖAB için 1 olacak şekilde planlanmaktadır.

Ekonomik analizde, sistem için izole bölge sayısını ve toplam ve birim bölge maliyetini hesaplamaktadır. Örnek veri setinde, 60 km hat uzunluğu için ÖAB oluşturma maliyetleri hesaplanmıştır. Literatürde, ortalama 15 km uzunluğunda ÖAB oluşturulabileceği ifade edilmiştir (Farley ve diğ., 2008). Bu kapsamda gerekli en az ÖAB sayısı hesaplanmış ve her ÖAB için 4 adet sınır vanası ve 1 adet debimetre imalatına, 2 adet sıfır basınç testi yapılmasına ve 1 adet izleme sistemine ihtiyaç olduğu varsayılmıştır. Ayrıca kullanıcılar mevcutta ÖAB olup olmadığını sisteme tanımlayabilmekte ve gerekli ÖAB sayısı bu kapsamda yeniden hesaplanmaktadır. Söz konusu imalatların toplam maliyetlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle yapılacak işlemlerinin birim fiyatlarının tanımlanması gerekmektedir (Şekil.3). Bu maliyetler Kayseri KASKİ ve Malatya MASKİ sahalarında yapılan çalışmalar, analizler esas alınarak ve 2020 yılı birim fiyatları dikkate alınarak belirlenmiş ve sisteme tanımlanmıştır.

Maliyetlerin Tanımlanması	Açıklama	Değer	Birim
Sınır Vanası Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer ₺ 1850	TL / Adet
Debimetre Odası Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer ₺ 70000	TL / Adet
Sıfır Basınç Testi Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer ₺ 750	TL / Adet
İzleme, İşletme ve Altyapı Kurulum Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer ₺ 25000	TL / Adet

DMA Birim Maliyetin Hesaplanması	Açıklama	Değer	Birim
Maliyetler Toplamı	Belirlenen değerler doğrultusunda DMA kurulumu maliyeti toplamını vermektedir.	415,600.00	TL
Birim DMA Maliyeti	Birim metre başına bir bölge için DMA oluşturulması maliyeti vermektedir.	6.93	TL / m

Şekil 3. ÖAB Ekonomik analiz modülünde maliyetlerin tanımlanması ve birim maliyetin hesaplanması

Figure 3. Defining costs and calculating unit cost in DMA Economic analysis module

Hesaplama aracı ile toplam uzunluğu 60 km olan bir şebekede etkili ve ekonomik bir su yönetimi sağlanabilmesi için 4 ÖAB oluşturulması gerektiği ve bu bölgeler için yaklaşık birim metre başına 6.93 TL maliyet ortaya çıkacağı hesaplanmıştır. İçmesuyu dağıtım sistemlerinde su kayıplarının azaltılması için yapılacak çalışmalarda gerek sistem giriş-çıkış debilerinin daha sağlıklı kontrol edilebilmesi gerekse uygulanan su kayıp azaltma yöntemlerinin izole bölgeler oluşturulmadan uygulanamayacak ve izlenemeyecek olması nedeniyle öncelikli olarak izole bölgeler oluşturulması gerekmektedir.

AKTİF KAÇAK KONTROLÜ İÇİN EKONOMİK ANALİZ MODÜLÜ (ANALYSIS MODULE FOR ALC)

Su kayıp yönetiminde bazı Su İdareleri, sadece rapor edilen arızaların onarımını kapsayan pasif kaçak kontrolünü yeterli görmektedir. Literatürde sızıntıların önemli bir kısmını rapor edilmeyen arızaların oluşturduğu ve bunların yönetilmesi için AKK yönteminin uygulanması gerektiği vurgulanmıştır (Lambert ve Lalonde, 2005; Pearson ve Trow, 2005; Farley ve diğ., 2008; Islam ve Babel, 2013). AKK'nin uygulanabilmesi için, teknik, teknolojik ve personel yapısının yeterli olması, yöntemin uygun ve

uygulanabilir olması, izole bölgenin tanımlanmış olması, maliyet bileşenlerinin hesaplanması gerekir. Bu nedenle bu çalışmada, bir Su İdaresinde AKK yönteminin uygulanmasıyla oluşan maliyetlerin hesaplanması için ekonomik analiz standardı tanımlanmış ve bu kadar detaylı analizlerin standart bir yapıda, saha verilerine göre tanımlanmış bileşenlere sahip ve hassas analiz imkanı sunan AKK analiz modülü geliştirilmiştir. Bu modülde ekonomik analiz için, şebeke uzunluğu, sızıntı miktarı, sistem basıncı, yıllık arıza sayısı, birim su üretim maliyeti, şebeke ve servis bağlantı arızası onarım maliyeti gibi veriler tanımlanmalıdır (Şekil.4).

Verilerin Girilmesi	Açıklama	Değer	Birim
Fiziksel Kayıp Miktarı	Su dengesi hesaplanmış ise 'Fiziki Kayıplar (m3)' değeri alınabilir. Birim m3/gün olmalıdır	6,000.00	m3/gün
Ortalama Sistem Basıncı	MNF analiz #21 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	40.00	m
UARL	(ILI analizinde hesaplanan UARL değeri alınmalıdır. Hesaplanmamış ise 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	3,250.00	l/gün
Bölgede Kaydedilen Yıllık Şebeke Arıza Sayısı	PI analiz #34 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	28.00	adet
Bölgede Kaydedilen Yıllık Abone Arıza Sayısı	PI analiz #35 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	52.00	adet
Şebeke Anahat Uzunluğu (Lm)	ILI analiz #9 verisi girilmişse ilgili değer (x1000) katı alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	60,000.00	m
Çalışma Süresi	Literatür çalışması ve uygulama tecrübesi ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 180	gün
Birim DMA Oluşturma Maliyeti	DMA Bölümünde hesaplanmış değer kullanılmaktadır.	(t)6.93	TL/m
Birim Su Üretim Maliyeti	PI analiz #45 verisi girilmişse ilgili değer alınacaktır. Aksi takdirde 'Veri Girişi' bölümünden veri girilmesi gerekmektedir.	(t)2.00	TL/m3
Şebeke Arızası Onarım Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer (t) 1850	TL/adet
Abone Arızası Onarım Maliyeti	Söz konusu fiyatlar Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2020 yılı İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları ve özel piyasa araştırmaları ile hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer (t) 1350	TL/adet

Şekil 4. AKK ekonomik analiz modülünde verilerin girilmesi ve maliyetlerin tanımlanması

Figure 4. Entering data and defining costs in ALC economic analysis module

Şekil 1'de tanımlanan parametrelerden farklı olarak analizlerde kullanılan, çalışma süresi parametresi, bölgede yüzeye çıkmayan sızıntıların farkına varılması, tespit edilmesi ve önlenmesi amacıyla yapılan çalışmaların ortalama süresini ifade etmektedir. Burada saha tecrübeleri ve literatür esas alınarak 180 gün tanımlanmış olup kullanıcının bu parametreyi değiştirmesi mümkün olmaktadır. Şebeke ve abone arızası onarım maliyeti parametreleri, yüzeye çıkan bir arıza için harcanan toplam maliyeti (işçilik, malzeme, kazı, dolgu ve yol kaplaması vb.) kapsamaktadır.

Ayrıca rapor edilmeyen arıza sayılarını hesaplamak için, rapor edilmeyen şebeke ve abone arızalarının birim kayıpları (Lambert ve diğ., 1999; Farley ve diğ., 2008) ve şebeke arızalarının toplam arızaya oranı tanımlanmıştır (Nicolini ve diğ., 2014; Aydoğdu ve Fırat, 2015; Boztaş, 2015) (Şekil 5). Rapor edilen arızalara ve kaçınılmaz kayıplara (UARL), AKK ile müdahale edilemediğinden dolayı, yıllık toplam kayıplardan rapor edilen sızıntılar ve UARL çıkartılarak müdahale edilebilir sızıntı hesaplanmaktadır (Şekil 5).

Tahmini İhbar Edilmeyen Arıza Sayılarının Tespiti	Açıklama	Değer	Birim
11 - Birim Şebeke Arızası Kaçak Miktarı	İhbar Edilen ve Edilmeyen Arızalardaki Kayıplar (Lambert vd., 1999; Farley vd., 2008) (m ³ /gün/basınç)	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 2.88	m ³ /gün/basınç
12 - Birim Abone Arızası Kaçak Miktarı	İhbar Edilen ve Edilmeyen Arızalardaki Kayıplar (Lambert vd., 1999; Farley vd., 2008) (m ³ /gün/basınç)	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 0.768	m ³ /gün/basınç
13 - Şebeke Arızası / Toplam Arıza Oranı	(Nicolini vd., 2014; Aydoğdu ve Firat, 2015; Boztaş, 2015).	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 38	%
14 - Abone Arızası / Toplam Arıza Oranı	(Nicolini vd., 2014; Aydoğdu ve Firat, 2015; Boztaş, 2015).	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 62	%
15 - Tahmini Şebeke Arızası Sayısı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	36.00	adet
16 - Tahmini Abone Arızası Sayısı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	59.00	adet

Müdahale Edilebilir Debinin Tesiti	Açıklama	Değer	Birim
17 - Arıza Kaynaklı Fiziki Kayıp Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	22.05	m ³
18 - Müdahale Edilebilir Debi	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	2,727.95	m ³

Birim Tarama Maliyetinin Belirlenmesi	Açıklama	Değer	Birim
Birim Tarama Maliyeti	Uygulama örneklemeleri sonucunda elde edilen $y = 3E-09x^2 - 0.0002x + 6.2972$ Denklemi yardımıyla hesaplanmaktadır.	5.10	TL/m

Şekil 5. AKK analiz modülünde rapor edilmeyen arızaların tespiti ve birim maliyetlerin hesaplanması
Figure 5. Detection of failures not reported in ALC analysis module and calculation of unit costs

AKK yönteminde bir diğer önemli parametre ise arama kalitesi (denetim yapılan şebekede tespit edilen ve onarılan arıza oranı) gösterilebilir. Bu parametre üzerinde genellikle tarama yapan ekiplerin tecrübesi oldukça önemli olup bu parametre için ortaya konulan performans doğrultusunda sistemin verimi değişmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar ve farklı idarelerde yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmış olan arama kalitesi parametreleri hesaplama aracına tanımlanmıştır (Şekil 6).

Arama Kalitesinin Tanımlanması	Açıklama	Değer	Birim
1. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 40	%
2. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 25	%
3. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 14	%
4. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 9	%
5. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 7	%
6. Arama Sonucunda Bulunan Arıza Oranı	Literatürde yapılan çalışmalar ve MASK’de yapılan saha çalışmaları/tecrübeleri doğrultusunda hesaplanmıştır.	<input checked="" type="radio"/> Standart Değer <input type="radio"/> Manuel Değer 5	%

Şekil 6. AKK Ekonomik analiz modülünde arama kalitesinin tanımlanması

Figure 6. Defining search quality in ALC Economic analysis module

Tüm değişkenlere ait maliyetlerin hesabından sonra birim maliyet hesabı yapılması için öncelikle her bir tarama döngüsü için toplam maliyet ve toplam fayda hesaplanmaktadır (Şekil 7). Böylelikle her bir dinleme periyodu için kurtarılan su miktarına karşılık harcanan tutar oranı hesaplanabilecektir. Su üretiminde suyun birim üretim maliyeti de hesaplama aracına tanımlandığından artık hangi dinleme periyodlarının ekonomik olduğu tespit edilebilecektir.

Dinleme Sonucunda Harcanan Tutarın Belirlenmesi	Açıklama	Değer	Birim
1. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	364,500.00	TL
2. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	342,562.50	TL
3. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	326,475.00	TL
4. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	319,162.50	TL
5. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	316,237.50	TL
6. Arama Sonucunda Harcanan Tutar	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	313,312.50	TL

Dinleme Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Açıklama	Değer	Birim
1. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır. Ekonomik olarak aktif kaçak kontrolüyle müdahale edilebilir su kaybını ifade etmektedir.	196,412.40	m ³ /Çalışma Süresi
2. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	122,757.75	m ³ /Çalışma Süresi
3. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	68,744.34	m ³ /Çalışma Süresi
4. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	44,192.79	m ³ /Çalışma Süresi
5. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	34,372.17	m ³ /Çalışma Süresi
6. Arama Sonucunda Kurtarılan Su Miktarı	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	24,551.55	m ³ /Çalışma Süresi

Şekil 7. AKK ekonomik analiz modülünde harcanan tutarların ve tasarruf edilen su miktarının hesabı

Figure 7. Calculation of the amount spent and the amount of water saved in the ALC economic analysis module

Şebekeler için birim su üretim maliyetleri AKK yöntemi için çok kritik bir rol üstlenmektedir. Suyun kaynaktan iletim hatlarına terfili iletim taşınması veya arıtma yapılması ihtiyacı gibi ciddi maliyet kalemleri doğurduğu düşünüldüğünde su üretim maliyetleri farklı olacaktır. Örnek veri seti incelendiğinde 1. Arama döngüsünde suyun birim miktarının kurtarılması için 1.83 TL harcandığı görülmektedir. Düşünüldüğünde suyun üretim maliyetinin 1.83 TL'nin altında olduğu bir bölge için bu şartlar altında AKK yöntemini uygulamanın ekonomik olmadığı ortaya çıkacaktır. Aynı şekilde su birim üretim maliyetinin 5 TL olduğu bir bölge düşünülürse toplam 3. arama turundan elde edilecek suyun bile ekonomik sınırlar içerisinde olacağı görülecektir. Bölge için suyun birim maliyeti 2 TL tanımlandığı için sadece 1. arama döngüsünün uygulanması gerektiği ve bu çalışmaların sonucunda ekonomik olarak yaklaşık 1091 m³/gün (12.62 l/s) suyun sisteme kazandırılacağı hesaplanmıştır (Şekil 8).

Birim Maliyet Hesabı	Açıklama	Değer	Birim
1. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	1.86	TL/m ³
2. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	2.79	TL/m ³
3. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	4.75	TL/m ³
4. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	7.22	TL/m ³
5. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	9.20	TL/m ³
6. Arama Sonucunda Birim Maliyet	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır.	12.76	TL/m ³
Aktif Kaçak Kontrolü Sonucunda Elde Edilen Fayda	Açıklama	Değer	Birim
Toplam Aktif Kaçak Kontrolü Faydası	Girilen veriler doğrultusunda hesaplanmaktadır. Ekonomik olarak aktif kaçak kontrolüyle müdahale edilebilir su kaybını ifade etmektedir.	1,091.18	m ³ /gün

Şekil 8. AKK ekonomik analiz modülünde birim maliyetlerin hesabı

Figure 8. Calculation of unit costs in ALC economic analysis module

Bu hesaplama aracı ile toplam 60 km uzunluğa sahip bir şebeke için uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplama aracı ile toplam 60 km uzunluğa sahip bir şebeke için uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu şebekede etkili su kayıp yönetimi için ortalama 15 km uzunluğa sahip 4 izole bölgenin planlanması gerektiği belirlenmiştir. Bu bölgeler için yapılan ekonomik analizler sonucunda toplam maliyet 415 600 TL ve birim izole bölge oluşturma maliyeti 6.93 TL/m şeklinde hesaplanmıştır. Ayrıca AKK çalışmalarının yapılması durumunda saha verileri esas alınarak, şebeke ve servis bağlantı arıza onarım maliyetleri sırasıyla 1850 TL/arıza ve 1350 TL/arıza olarak belirlenmiştir. Yüze çıkmayan arızaların tespit ve yerini belirleme maliyetleri analiz edilmiş ve birim tarama maliyeti 5.10 TL/m olarak hesaplanmıştır. Son olarak AKK ile 1091,18 m³/gün su tasarrufu sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Görüldüğü gibi, geliştirilen ekonomik analiz modelinde izole bölge oluşturmada ve AKK yönteminin uygulanmasında harcanan toplam ve birim maliyetlerin (TL/m) hesaplanması ve bu yöntemlerden elde edilen faydaların analiz edilmesi mümkün olmaktadır. Pilot şebeke için yapılan analizde, izole bölge tasarımı ve AKK yönteminin uygulanması ile toplamda hat uzunluğu başına 12.03 TL/m maliyet ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sistemde tasarruf edilecek su miktarı, su üretim maliyeti ve su satış bedelleri göz önüne alındığında, su üretim maliyetinin 1.83 TL'nin altında olduğu bir bölge için aktif kaçak kontrolünün uygulamanın ekonomik olmadığı ancak su üretim maliyetinin 5 TL olduğu bir bölge düşünülürse toplam 3. arama turundan elde edilecek suyun bile ekonomik sınırlar içerisinde olacağı görülmektedir. Sonuç olarak geliştirilen bu hesaplama aracının özellikle, izole bölge oluşturma, AKK planlama, sızıntı yerinin tespiti ve ekip yönetimi bileşenleri ekonomik değerlendirme imkanı sunması, maliyet ve fayda bileşenlerini belli bir sistematığe göre hesaplaması açısından karar vericiler ve teknik personeller için referans oluşturma potansiyelinin oldukça yüksek olduğu düşünülmektedir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sürdürülebilir su kayıp yönetimi için, ÖAB ve AKK yöntemleri için, ekonomik analiz yapısının oluşturulması ve bu analizlerin sistematik ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için hesaplama aracının geliştirilmesi amaçlanmıştır. ÖAB planlaması ve sahada uygulanması İdare için önemli maliyet oluşturduğu için, maliyet oluşturan bileşenlerin tanımlanması, fayda ve maliyet analiz standardının tanımlanması ve detaylı ekonomik analizin yapılması için standart bir yapı oluşturulmuştur. Diğer taraftan, rapor edilmeyen sızıntıların yönetilmesinde uygulana AKK yöntemi, çeşitli araç, ekipman ve personel alt yapısına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, bir bölgede AKK yöntemi uygulanmadan önce, arama ve denetim, sızıntı onarımı vb. faaliyetler için fayda ve maliyet bileşenleri oluşturulmuş ve hesaplama yapısının tanımlanmıştır. Su kayıp yönetiminde en çok tercih edilen ve uygulanan bu süreçler için bu kadar detaylı analizlerin belli bir standart ve sistematikte yapılması için web tabanlı ekonomik analiz hesaplama aracı geliştirilmiştir. Geliştirilen hesaplama aracı ÖAB tasarımı ve uygulanması için ekonomik analiz modülü ve AKK ekonomik analiz modülünden oluşmaktadır. Sonuç olarak birbiri ile entegre çalışan bu modüllerin özellikle, su kayıp yönetimi temel yöntemleri için detaylı maliyet analizinin hesaplanması ve fayda maliyet analizinin gerçekleştirilmesi açısından referans oluşturacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Salih YILMAZ tarafından yapılan Doktora tezinden üretilmiştir. Yazarlar desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine (FOA-2018-626, FDK 2020-2053) teşekkür etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Berardi, L., Laucelli, D.B., Simone, A., Mazzolani, G., Giustolisi, O., 2016, "Active Leakage Control with WDNNetXL", *Procedia Engineering*, Cilt 154, ss. 62–70.
- Boztaş, F., 2017, "İçme Suyu Dağıtım Sistemlerinde Bina (Servis) Bağlantılarında Meydana Gelen Arızaların Analizi ve Su Kayıplarına Etkisi", İnönü Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. 104s.
- Candelieri, A., Soldi, D. and Archetti, F., 2015, "Cost-effective sensors placement and leak localization – the Neptun pilot of the ICeWater Project", *Journal of Water Supply: Research and Technology*, Cilt 64, Sayı 5, ss. 567–582.
- Cabral, M., Loureiro, D., Almedia, M.do., Covas, D., 2019, "Estimation of costs for monitoring urban water and wastewater networks", *Journal of Water Supply: Research and Techn.*, Cilt 68, Sayı 2, ss.87–97.
- Campbell, E., Izquierdo, J., Montalvo, I., Perez-Garcia, R., 2016, "A novel water supply network sectorization methodology based on a complete economic analysis, including uncertainties", *Water (Switzerland)*, Cilt 8, Sayı 5, 179.
- di Nardo, A., di Natale, M., Giudicianni, C., 2017, "Economic and energy criteria for district meter areas design of water distribution networks", *Water (Switzerland)*, Cilt 9, ss. 1–13.
- Aydogdu, M., Firat, M., 2015, "Estimation of Failure Rate in Water Distribution Network Using Fuzzy Clustering and LS-SVM Methods", *Water Resources Management*, Cilt 29, ss. 1575-1590.
- Gomes, R., Marques, A. S. A. and Sousa, J., 2013, "District Metered Areas Design Under Different Decision Makers' Options: Cost Analysis", *Water Resources Management*, Cilt 27, Sayı 13, ss. 4527–4543.
- Fallis, P., Hübschen, K., Oertlé, E., 2011, "Guidelines for Water Loss Reduction".ss 236
- Farley, M., Trow, S., 2003, "Losses in Distribution Networks. In: An examination of the benefits of leak detection". ISBN 1 900222 11 6
- Farley, M., Liemberger, R., 2005, "Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy", *Water Science and Technology: Water Supply*, Cilt 15, ss. 41–50
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z.B.M., 2008, "The Manager's Non-Revenue Water Handbook. A Guide to Understanding Water Losses"

- Ferrari, G., Savic, D., 2015, "Economic performance of DMAs in water distribution systems", *Procedia Eng* Cilt 119, ss. 189–195.
- Islam, M.S., Babel, M.S., 2013, "Economic analysis of leakage in the Bangkok water distribution system", *Journal of Water Resources Planning Management*, Cilt 139, ss. 209–216.
- Lambert, A., Lalonde, A., 2005, "Using practical predictions of Economic Intervention Frequency to calculate Short-run Economic Leakage Level , with or without Pressure Management". *Leakage Conf Proceeding*, ss. 1–12
- Lambert, A., Charalambous, B., Fantozzi, M., 2014, "14 Years Experience of using IWA Best Practice Water Balance and Water Loss Performance Indicators in Europe", *Proceedings of the WaterLoss Conference*.
- Lambert, A.O., Brown, T.G., Takizawa, M., Weimer, D., 1999, "A review of performance indicators for real losses from water supply systems", *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, Cilt 48, ss. 227–237.
- Lipiwattanakarn, S., Kaewsang, S., Pornprommin, A., Wongwiset, T., 2019, "Real benefits of leak repair and increasing the number of inlets to energy", *Water Sci, Cilt 14*, Sayı 3, ss. 714–725
- May, J., 1994, "Pressure dependent leakage. In": *World Water and Environmental Engineering*
- Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., Moridi, A., 2010, "Pressure management model for urban water distribution networks", *Water Resources Management*, Cilt 24, Sayı 3, ss. 437–458. doi: 10.1007/s11269-009-9454-x.
- Nicolini, M., Giacomello, C., Scarsini, M., and Mion, M., 2014, "Numerical modeling and leakage reduction in the water distribution system of Udine", *Procedia Engineering*, Cilt 70, ss. 1241-1250.
- Pearson, D., Trow, S.W., 2005, "Calculating the Economic Levels of Leakage", *Leakage 2005 Conf Proc*, ss. 1–16
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic D., Koppel, T., 2010, "A review of methods for leakage management in pipe networks", *Urban Water Journal*, Cilt 7, ss. 25–45.
- Sarrate, R., Blase, J., Nejjari, F., Quevedo, J., 2014, "Sensor placement for leak detection and location in water distribution networks", *Water Science & Technology: Water Supply*, Cilt 14, Sayı 5, ss. 795–803.
- Xin, K. Tao, T. Lu, Y., 2014, "Apparent Losses Analysis in District Metered Areas of Water Distribution Systems". *Water Resources Management*, Cilt 28, ss. 683–696.



BIOMARKER CANDIDATES IDENTIFIED IN BEHCET'S DISEASE USING INTEGRATIVE ANALYSIS

Tuba SEVİMOĞLU

Uskudar University, Bioengineering Department, İstanbul, TURKEY
tuba.sevimoglu@uskudar.edu.tr

(Geliş/Received: 27.09.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 20.02.2021)

ABSTRACT: Behcet's Disease is a rare auto inflammatory and autoimmune disorder that causes blood vessel inflammation throughout the body and can affect all organ systems. The pathophysiology of the disease is still under investigation. Since the symptoms are varying it is difficult to diagnose and there are no sufficient medical treatments for the disease. In this study Behcet's Disease gene (Samples from isolated CD4+ T cells and CD14+ monocytes) and miRNA expression (samples from platelet free plasma) datasets were statistically analyzed. Differentially expressed genes for CD4+ T cells and CD14+ monocytes have been identified and miRNA associated with this data were listed. Protein-protein and miRNA – target gene interaction networks were constructed and hubs of these networks were identified for both cell types. Metabolites and metabolic pathways associated with gene expression data were displayed and enrichment analysis was done to identify associated signaling pathways and diseases. Differentially expressed miRNAs of platelet free plasma samples were also identified. The analysis results indicated cell/tissue type dependent genomic reprogramming. Mutual hub miRNAs (hsa-miR-17-5p, hsa-miR-603, hsa-miR-375, hsa-miR-107, hsa-miR-454-3p, hsa-miR-650, hsa-miR-142-3p and hsa-miR-765) in all cell/tissue types and metabolites (guanidinoacetate and histone-L-lysine) for CD4+ and CD14+ cells may be considered as biomarker candidates. Future studies focusing on these candidate biomarkers might yield a diagnostic kit or design of enhanced therapeutics for Behcet's Disease.

Key Words: Behcet's Disease, gene expression, miRNA, interaction networks, metabolites

Bütünleştirici Analiz Kullanarak Behçet Hastalığında Biyobelirteç Adayları Belirlenmesi

ÖZ: Behçet Hastalığı, vücutta kan damarı iltihabına neden olan ve tüm organ sistemlerini etkileyebilen nadir bir oto enflamatuar ve otoimmün hastalıktır. Hastalığın patofizyolojisi halen araştırılmaktadır. Semptomlar değişkenlik gösterdiği için teşhis edilmesi zordur ve hastalık için yeterli tıbbi tedavi yoktur. Bu çalışmada Behçet Hastalığı gen (izole edilmiş CD4 + T hücreleri ve CD14 + monositlerinden örnekler) ve miRNA ekspresyonu (trombosit içermeyen plazmadan örnekler) veri setleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. CD4 + T hücreleri ve CD14 + monositleri için farklı şekilde ifade edilen genler tanımlanmış ve bu verilerle ilişkili miRNA listelenmiştir. Protein-protein ve miRNA - hedef gen etkileşim ağları oluşturulmuş ve bu ağların merkezi olanları her iki hücre tipi için belirlenmiştir. Gen ekspresyon verileri ile ilişkili metabolitler ve metabolik yollar ortaya konulmuş ve ilişkili sinyal yollarını ve hastalıklarını tanımlamak için zenginleştirme analizi yapılmıştır. Trombosit içermeyen plazma örneklerinin farklı olarak ifade edilen miRNA'ları da tanımlanmıştır. Analiz sonuçları, hücre/doku tipine bağlı genomik yeniden programlamayı göstermiştir. Tüm hücre/doku türlerinde merkezi miRNAlar (hsa-miR-17-5p, hsa-miR-603, hsa-miR-375, hsa-miR-107, hsa-miR-454-3p, hsa-miR-650, hsa-miR-142-3p and hsa-miR-765) ve CD4 + ve CD14 + hücreleri için metabolitler (guanidinoasetat ve histon-L-lizin) biyobelirteç adayları

olarak belirlenmiştir. Gelecekte yapılacak olan ve bu aday biyobelirteçlere odaklanan deneysel çalışmalar ile bir teşhis kiti veya geliştirilmiş terapötiklerin tasarımı gerçekleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Behçet Hastalığı, gen ifadesi, miRNA, etkileşim ağları, metabolitler

1. INTRODUCTION

Behcet's disease, which was first described by Hulusi Behçet in 1937, is a rare auto-inflammatory polygenetic disease that causes blood vessel inflammation and mostly presents itself as oral and genital ulcers and skin lesions. The disease pathogenesis has not been illuminated clearly (van der Houwen and van Laar 2020). Genetic and environmental factors take part in the immunopathogenesis of the disease (Tong et al. 2019). Symptoms of the disease are varying and are spread over time which makes it difficult to diagnose. And since it is a rare disease designing a diagnostic kit is also overlooked.

Gene expression studies, which started in 1977, mostly identify and evaluate mRNA levels of a particular gene. Presently the most broadly applied techniques for transcriptome analysis are qPCR and expression microarrays (Segundo-Val and Sanz-Lozano 2016). These techniques can also be used for miRNA expression analysis. miRNA's are short noncoding RNA's that take a crucial part in post-transcriptional regulation of gene expression. In a study done by Puccetti and coworkers gene expression and network analysis of BD was accomplished. Their results indicated highly connected clusters enriched in several signaling pathways such as T and B cell activation, type I IFN, JAK-STAT, and TLR (Puccetti et al. 2018a). In another study miRNA expression profiles of Behcet's Disease patients were analyzed. They determined miRNA markers associated with the disease which target pathways such as TNF and IFN gamma signaling pathways (Puccetti et al. 2018b).

Protein interactions mediate biological processes therefore it is important to interpret networks of these interactions in order to understand human diseases (Sevimoglu and Arga 2014). miRNA – Target gene interactions should also be evaluated to explore the genetic mechanism induced by miRNA expression. Both interaction networks should be assessed to get a holistic view of the mechanism. Hub molecules usually have greater connectivity than the other molecules in a network. Several well-known hub proteins take an influential part in diseases such as p53 and BRCA1 (Bertolazzi et al. 2013).

Metabolites are intermediates or end products of cellular metabolism and they can be used as biomarker in disease diagnostics. Exploring the metabolic pathways these metabolites are involved in may give us an idea of what is going on inside the metabolism in a disease state.

In the current study statistical analysis of gene expression and miRNA expression datasets for Behcet's Disease were done. Differentially expressed genes (DEGs) and miRNA were identified. Protein-protein and miRNA-target gene interaction networks were constructed and hubs of these interaction networks were put forward. Transcriptional regulators of the differentially expressed genes were established. Metabolites, metabolic pathways, signaling pathways and diseases associated with Behcet's Disease were also determined. Mutual as well as cell/tissue type specific disease mechanism was elucidated through this computational analysis.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Identification of Transcriptome and miRNAome

Datasets associated with Behcet's Disease (GSE61399 and GSE145191) were obtained from Gene Expression Omnibus (GEO). The samples for GSE61399 dataset were isolated CD14+ monocytes and CD4+ T cells from PBMC. The sample type for GSE145191 was platelets-free plasma. DEGs for both cell types and miRNA for platelet free plasma samples were determined separately via GEO2R (Barrett et al. 2013), an online analysis tool. For False Discovery Rate Benjamini-Hochberg method was selected (Benjamini and Hochberg 1995; Smyth et al. 2011). p-value < 0.05 and fold change (FC) were selected as cut off values. Genes with fold change values less than 0.65 were listed as downregulated and genes with fold change

values more than 1.5 were listed as upregulated for both cell types. The same rule was applied for differential miRNA expression. The DEG – protein associations were established using bioDBnet, online database (Mudunuri et al. 2009). Transcription Factors of Behcet's Disease DEGs for both cell types were identified using HTRIDB (Human Transcriptional Regulation Interactions database) (Bovolenta et al. 2012).

2.2. Construction of Interaction Networks

A protein interaction network of Behcet's Disease proteins for both cell types from GSE61399 data was constructed using protein interaction data obtained from the BIOGRID (Release: 3.4.164) database (Chatr-Aryamontri et al. 2017). miRNA – target gene interactions for both datasets (GSE61399 and GSE145191) were also mapped using the miRTarbase repositories (Chou et al. 2018). The networks were constructed via online visualization tool Cytoscape (version 3.8.0). The hubs of the protein interaction as well as miRNA- target gene interaction networks were identified using Cytohubba plug in of Cytoscape (version 3.8.0) (Chin et al. 2014; Excoffier et al. 2017). Two mostly commonly used metrics, degree and betweenness centrality, were selected in the identification of hub proteins and hub miRNA. The degree metric counts the number of interactions a protein has, and betweenness centrality calculates how many times a protein is situated on the shortest path between two proteins in a network.

2.3. Disease and Signaling Pathway Enrichment

Enrichment analysis is a method used to identify functional profile of a group of genes to better understand the underlying biological processes surrounding this gene list. Differentially Expressed Behcet's Disease genes for both cell types were enriched to explore gene - disease and signaling pathway associations using DAVID (v6.8) (The Database for Annotation, Visualization and Integrated Discovery) an online bioinformatics tool (Huang et al. 2009), which uses information from Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes (Kanehisa et al. 2017) and The Genetic Association Database (GAD). Analysis results with a cut-off value of $p < 0.05$ were selected for statistical significance.

2.4. Reporter Metabolite and Metabolic Pathway Analysis

BIOMET Toolbox was used to integrate DEGs of each cell type (for GSE61399 dataset) into Human Metabolic Model HMR 2.0 (Agren et al. 2013; Mardinoglu et al. 2014). Benjamini correction was used and metabolites with $p < 0.05$ were accepted as statistically significant. MBRole bioinformatics tool (López-Ibáñez et al. 2016) was used to identify metabolic pathways as well as diseases associated with these metabolites.

3. RESULTS

In this study, gene (GSE61399) and miRNA (GSE145191) expression datasets of Behcet's disease were analyzed and up/down regulated genes and miRNA were uncovered. For GSE61399 dataset there are two different cell types. Analysis for these cell types were done separately. For CD4+ T cells there are 127 upregulated and 342 downregulated DEGs. Seven of the DEGs for CD4+ T cells are TFs (KLF4, LEF1, PLAGL1, STAT1, STAT2, ZBTB44 and ZEB2). Four of the TFs are upregulated and three of them are downregulated. For CD14+ monocytes samples, there are 473 upregulated and 568 downregulated DEGs. 28 of the DEGs for this data are also TFs (AHR, ARNT, BCL11A, E2F4, E4F1, ELF1, ELK1, FLI1, FOXO3, IKZF1, JUND, LRRFIP1, NFAT5, NFATC3, NR1D1, NR2C2, PAX8, POU2F1, RARA, RBPJ, SPDEF, TCF3, THRA, VDR, ZEB2, ZNF417, ZNF419 and ZXDC). 11 of the TFs are upregulated and 17 of them are downregulated. The number of downregulated DEGs for both cell types are higher than the upregulated ones. There are 73 mutual DEGs between both data. While 19 of the mutual DEGs were upregulated in both cell types, 26 of the mutual DEGs were downregulated. 29 mutual DEGs changed expression

direction according to their cell type. Only one mutual DEGs is a TF (ZEB2) and it is downregulated in CD4+ and upregulated in CD14+ cells.

The PPI network for both cell types were also constructed. The PPI network for CD4+ T cells has 200 nodes and 199 edges, and the PPI network for CD14+ monocytes has 814 nodes and 3055 edges (Figure 1).

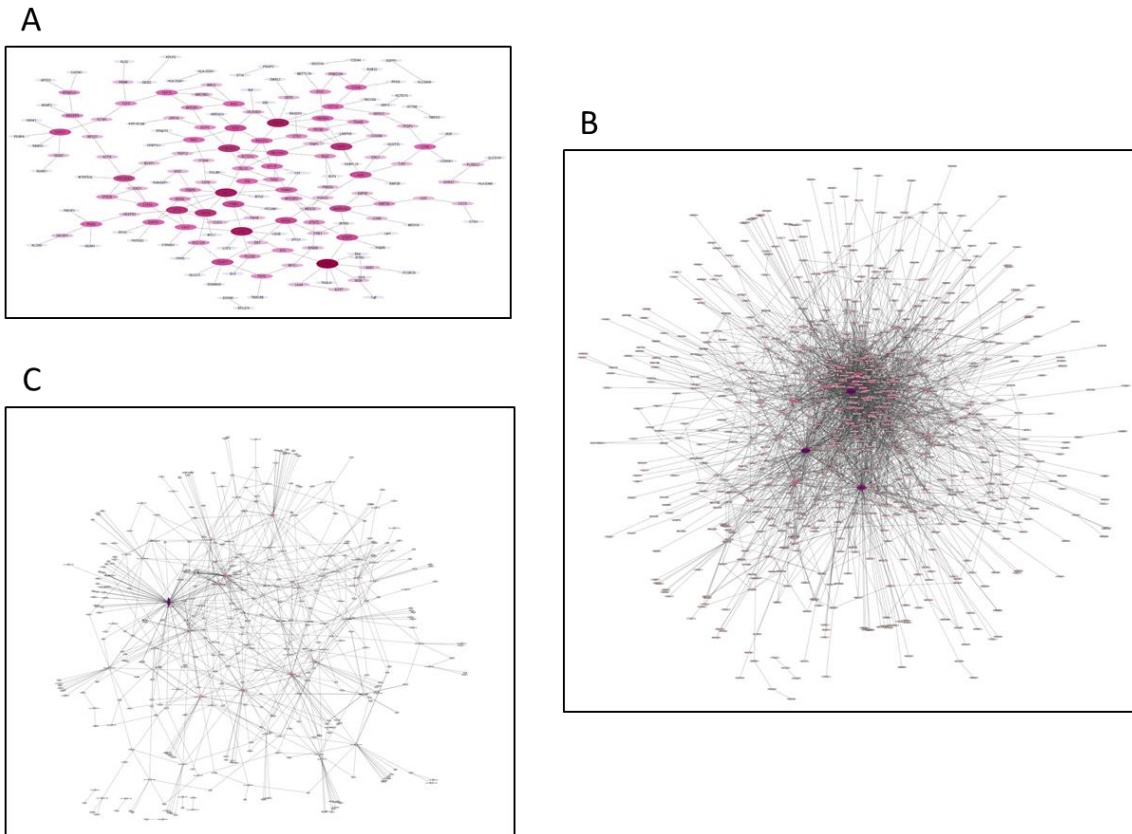


Figure 1. a) PPI network for DEGs associated with CD4+ T cells b) PPI network for DEGs associated with CD14+ monocytes c) miRNA – target gene network for GSE145191 dataset. (Nodes with higher number of interactions are darker colored and larger shaped)

The PPI network for CD14+ monocytes is denser than CD4+ T cells. The hubs for both PPI networks according to degree and betweenness metrics are shown in Table 1. There are five hubs for CD14+ monocytes (NR2C2, KRAS, APP, LARP7 and CDC5L) and six hubs for CD+4 T cells (KSR1, RAB7A, SYK, ST13, UBE2D1 and SMARCA2). There are no mutual hubs for both cell types. ST13, which is a hub for CD4+ T cells is the only mutual DEG among the hubs and it is upregulated for both cell types.

Table 1. Hubs of the PPI network for different cell types (hubs of each cell type are shown in bold)

CD14+ Monocytes				CD4+ T Cells			
<i>hubs</i>	<i>degree</i>	<i>hubs</i>	<i>betweenness</i>	<i>hubs</i>	<i>Degree</i>	<i>hubs</i>	<i>betweenness</i>
NR2C2	131.0	APP	112801.4	JAK1	8.0	KSR1	7082.4
KRAS	129.0	KRAS	106717.7	RAB7A	7.0	RAB7A	6338.4
APP	122.0	NR2C2	808146.5	SYK	7.0	KCTD12	6058.2
LARP7	81.0	LMNA	367275.9	KSR1	7.0	SYK	4584.0
CHD4	66.0	LARP7	354923.6	HSPA4	6.0	ST13	4469.3
LMNA	58.0	FBXW7	238702.8	UBE2D1	6.0	UBE2D1	3931.7
CDC5L	58.0	CDC5L	216164.5	ST13	6.0	VAV2	3869.8
NRAS	58.0	CALM1	177510.2	VAPA	6.0	PSMB2	3694.0
ITGA4	53.0	YWHAZ	173068.4	TBL1XR1	5.0	RHOA	3075.5
IFI16	47.0	SYNCRIP	161082.0	SMARCA2	5.0	SMARCA2	3036.9

There are 2523 miRNA associated with CD14+ T cells and 2225 miRNA associated with CD4+ monocytes. There are 2207 miRNA mutual between data for CD4+ and CD14+ cells. The miRNA – target gene network for CD4+ cells has 2572 nodes and 10786 edges. For CD14+ cells the network has 3394 nodes and 32868 edges. The hubs of both miRNA-target gene networks for GSE61399 data according to degree and betweenness metrics are given in Table 2. There are seven hubs for CD14+ monocytes and five hubs for CD4+ T cells. FEM1A is a hub in the miRNA – target gene network and downregulated for both cell types.

Table 2. Hubs of the miRNA –target gene network for CD4+ and CD14+ cells (hubs are shown in bold)

CD14+ Monocytes				CD4+ T Cells			
<i>hubs</i>	<i>Degree</i>	<i>hubs</i>	<i>Betweenness</i>	<i>hubs</i>	<i>Degree</i>	<i>hubs</i>	<i>Betweenness</i>
FEM1A	229.0	FEM1A	497476.0	UBN2	478.0	UBN2	313508.2
TNRC6B	201.0	CDK6	400795.0	PPP1R15B	473.0	FEM1A	310711.1
CDK6	188.0	TNRC6B	384570.7	DNAJB9	353.0	PPP1R15B	293468.6
DCAF7	174.0	DCAF7	315727.9	MYLIP	344.0	hsa-miR-16-5p	278630.7
CYCS	137.0	hsa-miR-335-5p	211859.6	VMP1	337.0	YWHAZ	245728.4
KLHDC10	124.0	KMT2A	196048.1	FEM1A	332.0	LDLR	222504.0
TFDP2	121.0	ACTB	192948.4	BZW1	324.0	hsa-miR-335-5p	219017.8
ZBTB20	117.0	MYLIP	183280.8	LDLR	314.0	BZW1	214986.2
RAB32	117.0	KLHDC10	179472.2	BCL2L11	307.0	TNRC6B	206782.4
MYLIP	114.0	CYCS	176564.8	YWHAZ	302.0	MED28	202751.4

Differentially expressed miRNAs for Behcet's disease were also identified through analyzing GSE145191 dataset with samples from platelets-free plasma. The miRNA analysis yielded a differentially expressed miRNA list with 196 upregulated and 66 downregulated miRNAs totaling 262 for homo sapiens. Mutual miRNA for both datasets and three different sample types is 72.

The construction of miRNA-Target gene interaction network for GSE145191 dataset yielded 402 nodes and 707 edges (Figure 1). There are eight hub miRNA's (hsa-miR-17-5p, hsa-miR-603, hsa-miR-375, hsa-miR-107, hsa-miR-454-3p, hsa-miR-650, hsa-miR-142-3p and hsa-miR-765) mutual in the hub analysis considering both metrics (Table 3). These hub miRNAs are also in the mutual miRNA list for the GSE61399 dataset.

Table 3. miRNA – target gene hub analysis according to the selected metrics.

Hubs	Degree	Hubs	Betweenness
hsa-miR-17-5p	82.0	hsa-miR-17-5p	54067.7
hsa-miR-603	34.0	hsa-miR-603	21259.1
hsa-miR-520b	29.0	hsa-miR-375	16275.8
hsa-miR-375	29.0	hsa-miR-107	14292.9
hsa-miR-107	28.0	hsa-miR-454-3p	12879.9
hsa-miR-454-3p	26.0	hsa-miR-650	11276.8
hsa-miR-512-3p	23.0	hsa-miR-142-3p	10989.1
hsa-miR-142-3p	22.0	hsa-miR-30e-5p	10703.1
hsa-miR-650	21.0	UBN2	10686.9
hsa-miR-765	19.0	hsa-miR-765	9924.9

Enrichment analysis was done for DEGs of both cell types. Arthritis may be mutual disease association for both data. Enrichment analysis was also done to identify signaling pathways. There are three mutual signaling pathways (hsa04666: Fc gamma R-mediated phagocytosis, hsa04520: Adherens junction and hsa04145: Phagosome). The Top five diseases and signaling pathways associated with both cell types are listed in Table 4.

Table 4. Top Five Diseases and Signaling Pathways Associated with GSE61399

CD4+ T Cells		CD14+ Monocytes	
Disease Association			
Term	PValue	Term	PValue
Hepatitis, autoimmune	0.0028	Familial Mediterranean Fever; hyper-IgD syndrome	4,19E-04
Rheumatoid Arthritis	0.0043	Diarrhea Familial Mediterranean Fever Pain Stomatitis, Aphthous	0,0066
Vascular Diseases	0.0044	Amyloidosis Behcet Syndrome Familial Mediterranean Fever Irritable Bowel Syndrome	0,0066
Tobacco Use Disorder	0.0049	Head and Neck Neoplasms Neoplasm Recurrence, Local Neoplasms, Second Primary	0,0066
Myocardial Infarction	0.0059	Arthritis	0,00672
Signaling Pathways Association			
Term	PValue	Term	PValue
hsa04380:Osteoclast differentiation	0.0014	hsa04915:Estrogen signaling pathway	0,0051
hsa05145:Toxoplasmosis	0.0015	hsa04010:MAPK signaling pathway	0,0063
hsa05152:Tuberculosis	0.0042	hsa04350:TGF-beta signaling pathway	0,0116
hsa04666:Fc gamma R-mediated phagocytosis	0.0045	hsa04722:Neurotrophin signaling pathway	0,0222
hsa05412:Arrhythmogenic right ventricular cardiomyopathy	0.0059	hsa04145:Phagosome	0,0244

Reporter metabolite analysis was also done for GSE61399 dataset for both cell types. There were 81 reporter metabolites associated with CD4+ cells and 91 reporter metabolites associated with CD14+ cells. There are only three mutual metabolites: [protein]-L-serine (C02189), guanidinoacetate (C00581) and histone-L-lysine (C02415). Metabolic pathways associated with both cell types were also uncovered. There were 3 metabolic pathways associated with CD4+ cells and 9 metabolic pathways associated with CD14+ cells. There was only one mutual metabolic pathway: O-Glycan biosynthesis. The five metabolic pathways with lowest p-values are listed in Table 5. Diseases associated with the metabolites of each cell type were also identified. While there were no mutual disease associations, several diseases came into prominence for each cell type such as Hypertension and diabetes for CD14+ Monocytes and epilepsy and schizophrenia for CD4+ T cells.

Table 5. Top Five Metabolic Pathways and Diseases associated with GSE61399

CD14+ Monocytes		CD4+ T Cells	
Metabolic Pathways			
<i>Annotation</i>	<i>p-value</i>	<i>Annotation</i>	<i>p-value</i>
Biosynthesis of unsaturated fatty acids	2.48E-03	Metabolism of xenobiotics by cytochrome P450	7.42E-09
GnRH signaling pathway	3.37E-05	Aminoacyl-tRNA biosynthesis	1.23E-10
Fatty acid biosynthesis	0.0001	ABC transporters	4.36E-06
Fc gamma R-mediated phagocytosis	0.0001	Valine, leucine and isoleucine biosynthesis	0.0032
Long-term depression	0.0002	Cysteine and methionine metabolism	0.0042
Disease Association			
<i>Annotation</i>	<i>p-value</i>	<i>Annotation</i>	<i>p-value</i>
Essential hypertension	2.52E-05	Leukemia	3.55E-12
Gestational diabetes	5.01E-05	Epilepsy	2.17E-07
Headache	0.0014	Schizophrenia	2.10E-06
Hypertension	0.0023	Heart failure	0.0002
Thyroid cancer	0.0234	Dengue fever	0.0005

4. DISCUSSION

In this study differentially expressed genes and miRNA's of Behcet's Disease were explored through computational analysis. Samples of the gene expression data analyzed were taken from isolated CD4+ T cells and CD14+ monocytes of PMBC, and for miRNA expression data they were taken from platelet free plasma. Interaction networks for DEGs and differentially expressed miRNA were constructed and hubs of these interaction networks were identified. Transcriptional regulators of the disease genes were put forward. The gene expression data was enriched with signaling pathways and diseases associated with the Behcet's DEGs. Reporter metabolites and metabolic pathways linked to DEGs were also displayed.

From the 73 mutual DEGs for GSE61399 there was only one mutual Transcriptional Factor; ZEB2 (Zinc finger E-box-binding homeobox 2) and it shows different regulation direction in each cell type. ZEB2 functions as a DNA-binding transcriptional repressor and is involved in pathways that regulate early growth and development. Mutations in this gene have been associated with Hirschsprung disease/Mowat-Wilson syndrome (Garavelli and Mainardi 2007). Deficiency of this protein causes disruption in the formation of organs and tissues before birth. FEM1A (Fem-1 Homolog A) which is a hub for miRNA – target gene network of GSE6161399 dataset has been downregulated in both cell types. It is sex gene which has been previously associated with polycystic ovary syndrome (Goodarzi et al. 2008).

Distinct number of hub proteins emerged as a result of the interaction network analysis. None of these hub proteins were TFs and there were no mutual hub proteins between the different cell types. For CD14+ Monocytes, NR2C2 and APP are the top hubs for degree and betweenness metrics respectively. NR2C2

(Nuclear Receptor Subfamily 2 Group C Member 2) gene encodes a protein that is from the nuclear hormone receptor family. This protein functions as protector of cells from oxidative stress. Overexpression of NR2C2 has been associated with adenoma progression previously (Yao et al. 2019). NR2C2 has been downregulated in this study. APP (Amyloid Precursor Protein) functions as a cell surface receptor and is involved in cell mobility through interacting proteins. Amyloid beta peptides are a notable part of amyloid plaques found in Alzheimer's patients (O'Brien and Wong 2011). Behcet's disease has been previously linked to renal diseases such as amyloidosis which is the formation of soft tissue in kidneys and most common cause of renal failure for this disease (Akpolat et al. 2008). For CD4+ T cells, RAB7A and SYK are hub proteins among several others. RAB7A (Member RAS Oncogene Family) is from a family of proteins that regulate vesicular transport. Mutations in this gene causes Charcot-Marie-Tooth Disease which induces damage to peripheral nerves (Reilly et al. 2011). RAB7A is downregulated in Behcet's Disease. SYK (Spleen Tyrosine Kinase) which is also dysregulated in the analysis is a modulator of epithelial cell growth. SYK inhibitors are used in treatment of rheumatic diseases (Deng et al. 2016). Joint pain and swelling in knees and elbows are common symptoms for Behcet's Disease and Rheumatic diseases. ST13 (Progesterone Receptor-Associated P48 Protein) which is another hub for CD4+ T cells is mutually upregulated in both cell types.

In this study eight hub miRNAs were prominent in both datasets and three cell types. hsa-miR-17-5p regulates cell cycle to stimulate cell proliferation. Previous studies show hsa-miR-17-5p function as an oncogenic miRNA in cancer progression (Wang et al. 2019). In another study, hsa-miR-17-5p was down regulated in women with endometriosis (Jia et al. 2013). Another hub miRNA of this study, hsa-miR-375, is shown to promote inflammatory bowel disease through upregulation of TLR4 (Wu et al. 2019). Recently hsa-miR-375 has been put forward as a biomarker for migraine aura (Gallelli et al. 2019). hsa-miR-603 has been proposed as a marker for amyotrophic lateral sclerosis as well as Alzheimer's Disease previously (Zhang et al. 2016; Foggin et al. 2019). Prior studies have linked hsa-miR-765, another hub miRNA, to coronary disease, several cancers as well as Kawasaki Disease (Chen et al. 2018). The eight hub miRNAs of the study are mutual for all datasets, so it is safe to say that they can be candidate biomarkers of Behcet's disease for CD4+ and CD14+ cells and platelet free plasma.

The GSE61399 dataset has a common disease for both cell types: Arthritis. This disease is common in Behcet's Disease patients and it can show up as different forms in different patients (Park 1999). The data was also enriched for signaling pathways and three mutual signaling pathways have been put forth. Fc gamma R-mediated phagocytosis is a crucial part of the innate immune response and is important in response to infections. This pathway is commonly dysregulated in inflammatory diseases such as Behcet's and Crohn's (Mkaddem et al. 2019). Adherens junction is another mutual signaling pathway for both cell types. The disconnection between Adherens junctions and the underlying cytoskeleton may cause outflow of plasma components into the neighboring tissues, which leads to edema which is a major symptom of Behcet's Disease (Bouillet et al. 2013). The other mutual pathway for both cell types is Phagosome. Phagocytes remove unfamiliar particles, bacteria, and dead cells to protect the body. This process is called phagocytosis which is actually a defense mechanism against infectious agents. A phagosome is formed, achieves digestive properties when specific receptors on the phagocyte surface recognize ligands on the particle surface and matures through interaction with other membrane organelles. The fusion of phagosomes and lysosomes releases toxic products that kill most bacteria and degrade them into fragments. Dysregulation of phagosome pathway may result in problems with degradation of bacteria, dead cells or unfamiliar particles. Previous studies indicate a phagocytic dysfunction in severe Behcet's disease cases (Perazzio et al. 2015).

In this study there are three mutual metabolites: [protein]-L-serine (C02189), guanidinoacetate (C00581) and histone-L-lysine (C02415) that come forward as a result of the analysis. A recent study has identified various metabolites associated with Behcet's disease using synovial fluids (Ahn et al. 2015). This study has a comprehensive list of metabolites which includes L-serine but does not include guanidinoacetate and histone-L-lysine. Guanidinoacetate is used as a biomarker to differentiate between Arginine glycine amidinotransferase deficiency and Guanidinoacetate methyltransferase deficiency. It

should be further looked into as a biomarker of Behcet's Disease. There was only one mutual metabolic pathway in the analysis: O-Glycan biosynthesis. O-linked glycans function in cellular activities such as protein stability, immunity, receptor-mediated signaling and protein expression. They also mediate recognition between proteins. Dysregulation of this metabolic pathway is known to cause congenital disorders in humans (Wopereis et al. 2006) as well as infectious diseases (Taylor et al. 2018).

In conclusion this study pinpoints several hub proteins, hub miRNA, signaling pathways and diseases associated with Behcet's Disease as well as reporter metabolites and metabolic pathways through a systems biology approach. This study also exhibits the diversity of the analysis results according to sample types. Due to the lack of additional Microarray datasets for Behcet's disease, two different cell types were analyzed. This may be regarded as a limitation of this study. Though there are mutual DEGs there were no mutual hub proteins for both cell types. The hub miRNA and reporter metabolites could be evaluated further in experimental studies for their biomarker capacities. Moreover, these biomarker candidates may be helpful in the design of a diagnostic kit for the disease.

REFERENCES

- Agren R, Liu L, Shoaie S, et al (2013) The RAVEN Toolbox and Its Use for Generating a Genome-scale Metabolic Model for *Penicillium chrysogenum*. *PLoS Comput Biol*. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002980>
- Ahn JK, Kim S, Kim J, et al (2015) A comparative metabolomic evaluation of behcet's disease with arthritis and seronegative arthritis using synovial fluid. *PLoS One*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135856>
- Akpolat T, Dilek M, Aksu K, et al (2008) Renal Behçet's Disease: An Update. *Semin Arthritis Rheum*. <https://doi.org/10.1016/j.semarthrit.2007.11.001>
- Barrett T, Wilhite SE, Ledoux P, et al (2013) NCBI GEO: Archive for functional genomics data sets - Update. *Nucleic Acids Res*. <https://doi.org/10.1093/nar/gks1193>
- Benjamini Y, Hochberg Y (1995) Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *J R Stat Soc Ser B*. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Bertolazzi P, Bock ME, Guerra C (2013) On the functional and structural characterization of hubs in protein-protein interaction networks. *Biotechnol. Adv*.
- Bouillet L, Baudet AE, Deroux A, et al (2013) Auto-antibodies to vascular endothelial cadherin in humans: Association with autoimmune diseases. *Lab Invest*. <https://doi.org/10.1038/labinvest.2013.106>
- Bovolenta LA, Acencio ML, Lemke N (2012) HTRIdb: an open-access database for experimentally verified human transcriptional regulation interactions. *BMC Genomics*. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-13-405>
- Chatr-Aryamontri A, Oughtred R, Boucher L, et al (2017) The BioGRID interaction database: 2017 update. *Nucleic Acids Res*. <https://doi.org/10.1093/nar/gkw1102>
- Chen Y, Ding YY, Ren Y, et al (2018) Identification of differentially expressed MicroRNAs in acute Kawasaki disease. *Mol Med Rep*. <https://doi.org/10.3892/mmr.2017.8016>
- Chin CH, Chen SH, Wu HH, et al (2014) cytoHubba: Identifying hub objects and sub-networks from complex interactome. *BMC Syst Biol*. <https://doi.org/10.1186/1752-0509-8-S4-S11>
- Chou CH, Shrestha S, Yang CD, et al (2018) MiRTarBase update 2018: A resource for experimentally validated microRNA-target interactions. *Nucleic Acids Res*. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx1067>
- Deng GM, Kytтарis VC, Tsokos GC (2016) Targeting syk in autoimmune rheumatic diseases. *Front. Immunol*.
- Excoffier L, Gouy A, Daub JT, et al (2017) Cytoscape: A Software Environment for Integrated Models of Biomolecular Interaction Networks. *Nucleic Acids Res*. <https://doi.org/10.1093/nar/gkx626>
- Foggin S, Mesquita-Ribeiro R, Dajas-Bailador F, Layfield R (2019) Biological significance of microRNA

- biomarkers in ALS-innocent bystanders or disease culprits? *Front. Neurol.*
- Gallelli L, Cione E, Peltrone F, et al (2019) Hsa-miR-34a-5p and hsa-miR-375 as Biomarkers for Monitoring the Effects of Drug Treatment for Migraine Pain in Children and Adolescents: A Pilot Study. *J Clin Med.* <https://doi.org/10.3390/jcm8070928>
- Garavelli L, Mainardi PC (2007) Mowat-Wilson syndrome. *Orphanet J Rare Dis.* <https://doi.org/10.1186/1750-1172-2-42>
- Goodarzi MO, Maher JF, Cui J, et al (2008) FEM1A and FEM1B: Novel candidate genes for polycystic ovary syndrome. *Hum Reprod.* <https://doi.org/10.1093/humrep/den324>
- Huang DW, Sherman BT, Lempicki RA (2009) Systematic and integrative analysis of large gene lists using DAVID bioinformatics resources. *Nat Protoc.* <https://doi.org/10.1038/nprot.2008.211>
- Jia SZ, Yang Y, Lang J, et al (2013) Plasma miR-17-5p, miR-20a and miR-22 are down-regulated in women with endometriosis. *Hum Reprod.* <https://doi.org/10.1093/humrep/des413>
- Kanehisa M, Furumichi M, Tanabe M, et al (2017) KEGG: New perspectives on genomes, pathways, diseases and drugs. *Nucleic Acids Res.* <https://doi.org/10.1093/nar/gkw1092>
- López-Ibáñez J, Pazos F, Chagoyen M (2016) MBROLE 2.0-functional enrichment of chemical compounds. *Nucleic Acids Res.* <https://doi.org/10.1093/nar/gkw253>
- Mardinoglu A, Agren R, Kampf C, et al (2014) Genome-scale metabolic modelling of hepatocytes reveals serine deficiency in patients with non-alcoholic fatty liver disease. *Nat Commun.* <https://doi.org/10.1038/ncomms4083>
- Mkaddem S Ben, Benhamou M, Monteiro RC (2019) Understanding Fc receptor involvement in inflammatory diseases: From mechanisms to new therapeutic tools. *Front. Immunol.*
- Mudunuri U, Che A, Yi M, Stephens RM (2009) bioDBnet: The biological database network. *Bioinformatics.* <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btn654>
- O'Brien RJ, Wong PC (2011) Amyloid precursor protein processing and alzheimer's disease. *Annu Rev Neurosci.* <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-061010-113613>
- Park JH (1999) Clinical analysis of Behçet disease: arthritic manifestations in Behçet disease may present as seronegative rheumatoid arthritis or palindromic rheumatism. *Korean J Intern Med.* <https://doi.org/10.3904/kjim.1999.14.1.66>
- Perazzio SF, Soeiro-Pereira P V., de Souza AWS, et al (2015) Behçet's disease heterogeneity: Cytokine production and oxidative burst of phagocytes are altered in patients with severe manifestations. *Clin Exp Rheumatol*
- Puccetti A, Fiore PF, Pelosi A, et al (2018a) Gene expression profiling in behçet's disease indicates an autoimmune component in the pathogenesis of the disease and opens new avenues for targeted therapy. *J Immunol Res.* <https://doi.org/10.1155/2018/4246965>
- Puccetti A, Pelosi A, Fiore PF, et al (2018b) MicroRNA expression profiling in behçet's disease. *J Immunol Res.* <https://doi.org/10.1155/2018/2405150>
- Reilly MM, Murphy SM, Laurá M (2011) Charcot-Marie-Tooth disease. In: *Journal of the Peripheral Nervous System*
- Segundo-Val IS, Sanz-Lozano CS (2016) Introduction to the gene expression analysis. In: *Methods in Molecular Biology*
- Sevimoglu T, Arga KY (2014) The role of protein interaction networks in systems biomedicine. *Comput Struct Biotechnol J* 11:22–27. <https://doi.org/10.1016/J.CSBJ.2014.08.008>
- Smyth GK, Ritchie M, Thorne N (2011) Linear Models for Microarray Data User ' s Guide. *Bioinformatics.* <https://doi.org/10.1093/nar/gkv007>
- Taylor SL, McGuckin MA, Wesselingh S, Rogers GB (2018) Infection's Sweet Tooth: How Glycans Mediate Infection and Disease Susceptibility. *Trends Microbiol.*
- Tong B, Liu X, Xiao J, Su G (2019) Immunopathogenesis of Behçet's disease. *Front. Immunol.*
- van der Houwen T, van Laar J (2020) Behçet's disease, and the role of TNF- α and TNF- α blockers. *Int. J. Mol. Sci.*
- Wang W, Dong R, Guo Y, et al (2019) CircMTO1 inhibits liver fibrosis via regulation of miR-17-5p and

- Smad7. *J Cell Mol Med.* <https://doi.org/10.1111/jcmm.14432>
- Wopereis S, Lefeber DJ, Morava É, Wevers RA (2006) Mechanisms in protein O-glycan biosynthesis and clinical and molecular aspects of protein O-glycan biosynthesis defects: A review. *Clin. Chem.*
- Wu CP, Bi YJ, Liu DM, Wang LY (2019) Hsa-miR-375 promotes the progression of inflammatory bowel disease by upregulating TLR4. *Eur Rev Med Pharmacol Sci.* https://doi.org/10.26355/eurrev_201909_18871
- Yao X, Zhang Y, Wu L, et al (2019) Immunohistochemical Study of NR2C2, BTG2, TBX19, and CDK2 Expression in 31 Paired Primary/Recurrent Nonfunctioning Pituitary Adenomas. *Int J Endocrinol.* <https://doi.org/10.1155/2019/5731639>
- Zhang C, Lu J, Liu B, et al (2016) Primate-specific miR-603 is implicated in the risk and pathogenesis of Alzheimer's disease. *Aging (Albany NY).* <https://doi.org/10.18632/aging.100887>



BOZDAĞLAR MASİFİ'NDEKİ (KONYA, ORTA ANADOLU) KIVRIMLARIN GEOMETRİK SINIFLAMASI

¹Melikan AKBAŞ , ²Yaşar EREN 

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

¹makbas@ktun.edu.tr, ²yeren@ktun.edu.tr

(Geliş/Received: 23.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 23.02.2021)

ÖZ: Bu çalışmada Bozdağlar Masifi'ndeki (Konya Kuzeyi) deforme kayalarda gözlenen kıvrımların geometrik sınıflamaları ve oluşum mekanizması açısından birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır. Altnekin, Meram-Dereköy ve Sarayönü bölgelerindeki Paleozoyik yaşlı metamorfik kayalarda gelişen toplamda yüze yakın kıvrım analiz edilerek eğim izogonları ve kanatlar arası açıya göre sınıflandırılmıştır. Dikey kalınlık grafikleri oluşturulan kıvrımlar için yassılma oranları hesaplanmıştır. Çalışma alanlarında yapılan geometrik sınıflamalarla, bölgede yassılmış paralel kıvrımların egemen olduğu ve kompetent tabakaların sınıf 1C, inkompetent tabakaların sınıf 2 ve sınıf 3 türü kıvrımlar oluşturacak şekilde kıvrımlandıkları görülmüştür. Altnekin bölgesindeki yassılmış sınıf 1C türü kıvrımlara ait yassılma oranları ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) kompetent (dayanımlı) tabakalar için 0.4-0.8, inkompetent (dayanımsız) tabakalar için 0.3-0.8, Meram-Dereköy bölgesindeki yassılmış sınıf 1C türü kıvrımlara ait yassılma oranı ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) kompetent tabakalar için 0.5-0.8, Sarayönü bölgesindeki yassılmış sınıf 1C türü kıvrımlara ait yassılma oranı ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) kompetent tabakalar için 0.7-0.9 aralığındadır. Yapılan Fleuty sınıflamasına göre ise yassılma oranlarıyla uyumlu olarak kıvrımların her üç bölgede benzer şekilde açık, dar ve sıkışık kıvrımlar olarak geliştiği, sadece Meram-Dereköy bölgesinde açık kıvrım gelişmediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bozdağlar Masifi, Altnekin, Meram-Dereköy, Sarayönü, Kıvrım, Eğim İzogonları, Fleuty Sınıflaması.

Geometrical Classification of Folds in the Bozdağlar Massif (Konya, Central Anatolia)

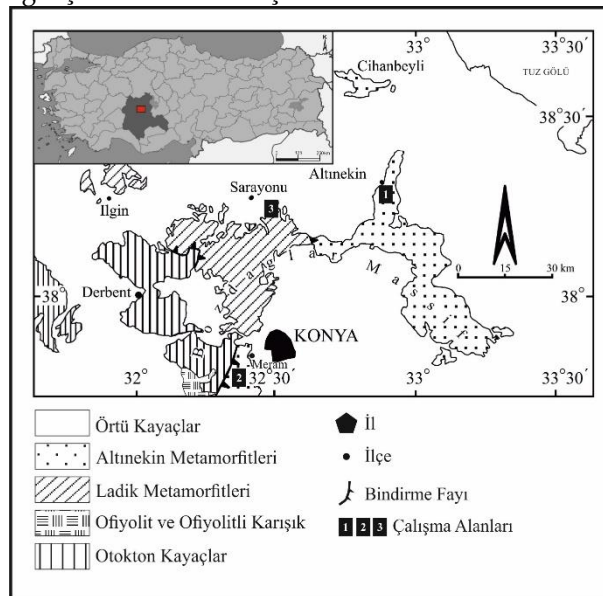
ABSTRACT: In this study, it is aimed to make geometrically classification and find formation mechanism of mesoscopic folds of that are occur in Bozdağlar Massif (Northern Konya), and to compare them. In the context of the study, nearly a hundred mesoscopic folds which are developed on metamorphic rocks were analyzed in the Altnekin, Meram-Dereköy and Sarayönü regions. The folds are classified based on the dip isogons and interlimb angles. The orthogonal thickness graphs of folds were constructed, and the flattening ratios were calculated. According to the geometrical classification of the folds it is detected that the flattened parallel folds (Class 1C) are the dominant fold type in the deformed rocks of the Bozdağlar Massif, and the folds in the competent rocks are generally represented by the Class 1C, whereas the folds of intervening incompetent rocks are characterized by Class 2 and Class 3. The Flattening ratios ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) of Class 1C folds of Altnekin area are 0.4-0.8 for competent rocks and 0.3-0.8 for incompetent rocks. In the Meram-Dereköy area these ratio ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) vary between 0.5 to 0.8 for folds in the competent rocks. The Class 1C folds that are observed in the vicinity of the Sarayönü area show 0.7 to 0.9 flattening value ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$). According to the Fleuty classification, it was determined that in accordance with flattening rates,

folds developed as open, narrow and tight folds in all three regions, except only open folds did not develop in the Meram-Dereköy region.

Key Words: Bozdağlar Massif, Altınekin, Meram-Dereköy, Sarayönü, Folds, Dip isogons, Fleuty classification.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnceleme alanları, Bozdağlar Masifi'ne ait deforme kayaçların yüzeylediği Konya İlinin kuzeyindeki Altınekin ve Sarayönü ile çoğunlukla ofiyolitik kayaçların yüzeylediği Meram-Dereköy ilçelerinde yer almaktadır (Şekil 1). Bozdağlar Masifi'nde yürütülen ilk ve temel çalışmalarda, Brennich (1954) Konya çevresinin 1/100.000 ölçekli jeolojik haritasını hazırlayarak bölgenin stratigrafik özelliklerini, Niehoff (1961) bölgede geniş yayımlı Permo-Mezozoyik yaşlı kayaçların varlığını ve Kaaden (1966) ise bölgedeki kayaçların Hersiniyen orojeni ile ilişkili olarak mavi-şist metamorfizmasına uğradığını ortaya koymuşlardır. Göğer ve Kırıl (1969) ilk kez litostratigrafi kurallarına uygun olarak bölgede yüzeyleyen Permiyen-Kuvaterner yaş aralığındaki kayaçları adlandırmışlardır. Bölgede gerçekleştirilmiş olan detaylı stratigrafik ve tektonik çalışmalarda, Özcan ve diğ. (1988) bölgede Paleozoyik-Mezozoyik yaşlı metamorfik kayaçların bulunduğunu ve Geç Paleozoyik yaşlı birimlerin Karbonifer yaşlı bir yay-ardı havzaya bağlı olarak evrimleştiğini, Eren (1993, 1996a, 1996b) ise Permiyen-Erken Kretase yaşlı Gökçeyurt Grubu'nun bölgedeki görünür temeli oluşturduğunu, Çayırbağı Ofiyolitleri ile Altınekin ve Ladik Metamorfitlelerinin bu topluluk üzerinde tektonik olarak yer aldığını belirlemiştir. Son yıllarda Konya ve çevresinde yapılan çalışmalarda bölgenin jeotektonik konumu (Eren ve Kurt, 2000; Eren ve diğ., 2004; Robertson ve Ustaömer, 2009; Robertson ve diğ., 2009, 2013; Göncüoğlu 2011) ve bölgedeki magmatik/vulkanik kayaçların köken, tip ve mutlak yaşlandırmalarına (Kurt 1994, 1996, 1997; Akal ve diğ., 2012; Koç ve diğ., 2012; Asan ve Ertürk, 2013; Özdamar ve diğ., 2013; Korkmaz ve diğ., 2017) yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Eren ve Kurt (2000) ve Eren ve diğ. (2004), Konya kuzeyinde yüzeyleyen kayaçların jeodinamik modellemesini yaparak, Triyas öncesinde güneye dalımlı bir dalma-batma boyunca bölgedeki Paleozoyik yaşlı kayaçların deformasyona uğradıklarını ve Mezozoyik öncesi kayaçların Paleo-Tetis ürünü olduklarını belirtmiştir. Robertson ve Ustaömer (2009) ise Konya kuzeyindeki Geç Paleozoyik yaşlı kayaçları Konya Kompleksi olarak adlandırmış ve bunların dalma-batma ve yığışım süreçleri ile geliştiklerini belirtmişlerdir.



Şekil 1. Bölgenin genelleştirilmiş jeoloji haritası (Eren,1993) ve çalışma alanları.

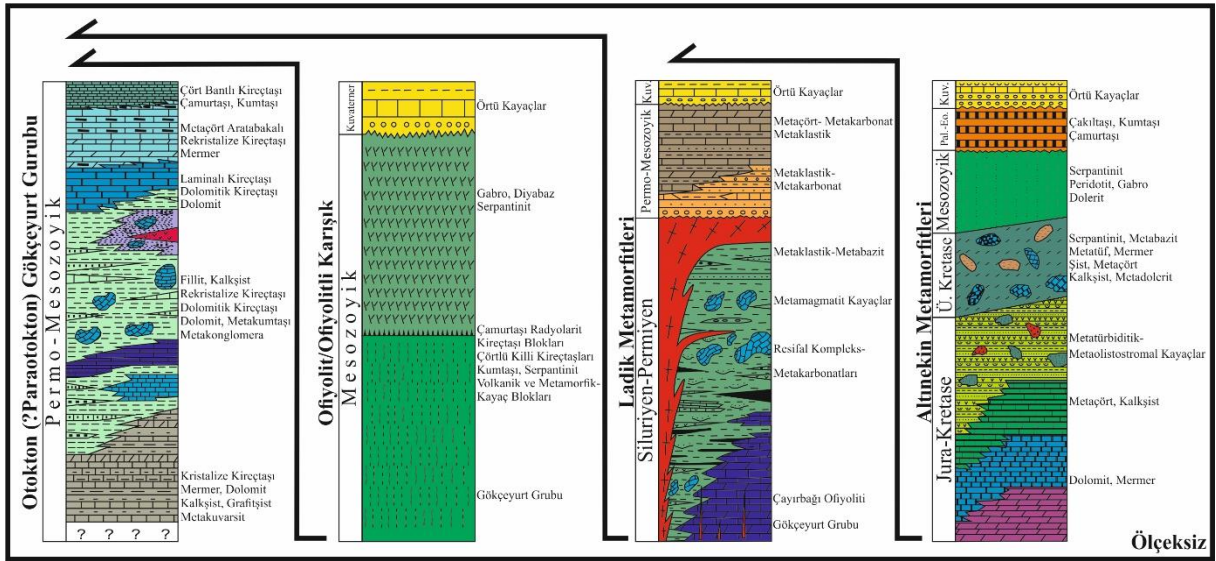
Figure 1. Generalized geology map of the region (Eren, 1993) and location of the study areas.

Çalışma alanı ve çevrelerindeki kayaçlar düşük-dereceli Paleozoyik-Mesozoyik yaşlı metamorfik kayaçlar (Altnekin, Sarayönü ve Meram-Dereköy) ve Mesozoyik yaşlı Ofiyolit/Ofiyolitli karışık (Meram-Dereköy) ile temsil olmaktadır (Eren, 1993, 1996a,b; Eren ve Kurt, 2000; Eren ve diğ., 2004). Alpin dağoluşum hareketlerinden etkilenen çalışma sahaslarındaki kayaçlardan Ladik Metamorfitleri en az dört evreli deformasyona maruz kalmışken (Eren, 2001), Altnekin Metamorfitleri ise en az altı evreli deformasyona uğrayarak kıvrımlanmış, yapraklanmış ve başkalaşıma uğramıştır (Eren, 2003). Kıvrımlar, deforme olmuş kayaçların en göze çarpan yapılarından biri olup çok farklı özelliklerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu sınıflamalardan biri de kıvrımlanmış tabakaların kıvrım eksenine dik kesitindeki (profil kesiti) görünümleri kullanılarak, bitişik tabakalarda aynı eğime sahip noktaların birleştirilmesiyle elde edilen eğim izogonlarının (eş eğim çizgileri) birbirlerine göre konumlarından yararlanılarak yapılan sınıflamadır (Ramsay, 1967). Fleuty (1964) tarafından geliştirilen ve kanatlar arası açıya göre yapılan kıvrım sınıflaması, Fleuty'nin yapmış olduğu bir diğer geometrik kıvrım sınıflaması olup, bu çalışmada eğim izogonları sınıflamasına ek olarak çalışılmıştır. Akbaş (2013) tarafından hazırlanan yüksek lisans tezinden üretilen bu çalışmada Bozdağlar Masifi'ndeki deforme kayaçlarda gözlenen kıvrımların eğim izogonları ve kanatlar arası açı yöntemleriyle geometrik ve oluşum mekanizması açısından incelenerek sınıflanması ve üç ayrı bölgede çalışılan kıvrımların oluşum mekanizması açısından birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

BÖLGESEL JEOLJİ (GEOLOGICAL SETTINGS)

Konya bölgesindeki kayaçlar farklı araştırmacılar tarafından Anatolidler (Ketin, 1966), Torid'ler içindeki Bolkardağı Napı (Özgül, 1976), Afyon-Bolkardağı Zonu (Okay, 1986), Kütahya-Bolkardağı Kuşağı (Özcan ve diğ., 1988; Göncüoğlu ve diğ., 2007; Göncüoğlu, 2011) ve Bozdağlar Masifi (Eren, 1993) kapsamında incelenmiştir. Eren (1993) bölgede yer alan kayaçların farklı tektono-stratigrafik özellikler sunduğunu belirtmiş ve Konya kuzeyindeki otokton (?paraotokton) ve allokton nitelikteki kayaçları topluca Bozdağlar Masifi olarak adlandırarak, masifin uyumsuz olarak neo-otokton birimler tarafından örtüldüğünü belirtmiştir. Bölgedeki kayaçlar Göncüoğlu (2011) tarafından ise genel olarak Konya-Tipi Paleozoyik temel, Orta Permiyen örtü, Mesozoyik platform istifleri ve İzmir-Ankara Okyanusu melanaj kompleksleri ve ofiyolitleri başlıkları altında incelenmiştir.

İnceleme alanları ve yakın çevrelerindeki kayaçlar genel olarak Bozdağlar Masifi'ne ait kayaçlar (Otokton kayaçlar, Ladik Metamorfitleri, Altnekin Metamorfitleri), okyanusal kayaç toplulukları (Ofiyolit ve Ofiyolitli karışık) ve örtü kayaçlardan oluşmaktadır (Eren, 1993) (Şekil 2). Meram-Dereköy ve çevresini kapsayan alanda, Mesozoyik yaşlı Ofiyolit/Ofiyolitik karışığı kayaçları ve Altnekin Metamorfitlerine ait metamorfik ve meta-sedimanter kayaçlar yüzylemektedir. Altnekin, Sarayönü ve çevresini kapsayan alanda ise Bozdağlar Masifi'ne ait allokton konumlu farklı litoloji, metamorfizma derecesi ve tektonik özelliğe sahip metamorfik, meta-sedimanter ve meta-magmatik birliklerden oluşan Altnekin ve Ladik Metamorfitleri yer almaktadır (Eren, 1993, 1996a, b; Eren ve Kurt, 2000; Eren ve diğ., 2004).



Şekil 2. Çalışma bölgesindeki otokton ve allokton birliklerin genelleştirilmiş dikme kesitleri (Eren, 1993 ve 2003'ten değiştirilerek alınmıştır).

Figure 2. Generalized columnar sections of the autochthonous and allochthonous units in the study area (Modified after Eren, 1993 and 2003).

Otokton (?paraotokton) Gökçeyurt Grubu (Eren, 1993) tabanda gri-siyah, kıt metaçört aratabakalı rekrystalize kireçtaşı, mermer, dolomit, kalkışist, grafitışist, fillit, beyaz-pembe metakuvarsit ve monojenik metakuvarsit konglomeraları ile temsil olmaktadır. Bu birimlerin üzerine uyumlu olarak mor ve alacalı fillit, kalkışist, rekrystalize kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, dolomit, metakumtaşı ve metakonglomeralı seviyeler gelmektedir. İstifin en üst kısmı ise yanal düşey geçişli olarak, gri-siyah renkli, yer yer laminallı kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı ve dolomitler, gri-mavi-beyaz renkli, nadir metaçört aratabakalı rekrystalize kireçtaşı, mermerler ve kırmızı-gri renkli çört bantlı pembe-gri renkli kireçtaşı, çamurtaşı ve kumtaşlarıyla karakteristiktir (Göğür ve Kıral, 1969; Özcan ve diğ., 1988; Eren, 1993).

Mesozoyik yaşlı Ofiyolit/Ofiyolitli karışık; tabanda kırmızı çamurtaşı ve radyolaritlerle başlayan çeşitli özellikteki kireçtaşı blokları, çörtlü killi kireçtaşları, çamurtaşı, kumtaşı, serpantinit, volkanik ve metamorfik kayaç bloklarından ve ofiyolitik kayaç kırıntıları içeren bir matriksten oluşmaktadır. Ofiyolit karmaşık üzerine tektonik dokanakla gelen ofiyolit seri ise gri, yeşil ve kahve renkli gabro, diyabaz ve az oranda serpantinitlerle temsil olmaktadır (Eren, 1993).

Eren (1993) tarafından Sızma ve Ardıçlı Grupları altında incelenen Ladik Metamorfittlerinin alt kısmına karşılık gelen Sızma Grubu tabanda resifal kompleks metakarbonatlardan ve üstte metaklastik-metabazit aralanmalarından oluşmaktadır. Meta-magmatit kayaçlar ise bu birimler içerisinde stok ve dayklar halinde gözlenmektedir. Sızma Grubu'nun üzerine uyumsuz olarak gelen Ardıçlı Grubu ise tabandan tavana doğru kaba metaklastik, metaklastik-metakarbonat aralanması ile metaçört, metakarbonat ve metaklastiklerin aralanmasından oluşmaktadır. (Özcan ve diğ., 1988; Eren, 1993; Eren ve diğ., 2004; Robertson ve diğ., 2009; Akal, 2012).

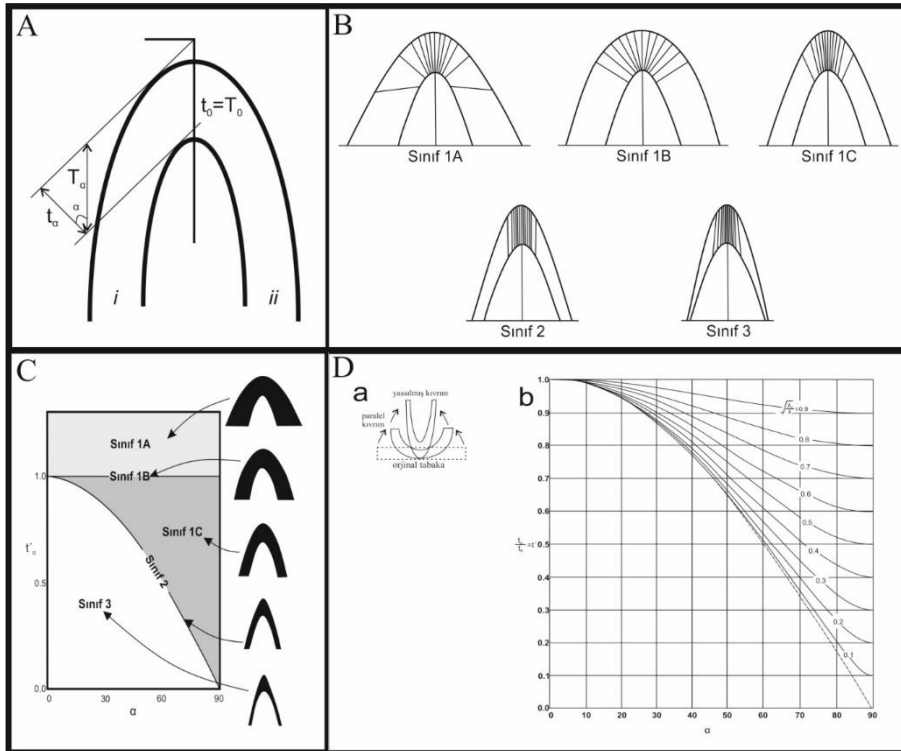
Altnekin Metamorfittleri tabanda yanal düşey geçişli olarak gri-koyu gri-siyah renkli dolomit ve mermerler, beyaz-krem-sarı-gri renkli mermerler, beyaz-gri-pembe metaçört, beyaz-gri mermer, sarı-gri kalkışist aralanması ile yeşil-mavi renkli metatürbiditik ve metaolistostromal kayaçlarla temsil olmaktadır. Bu birimlerin üzerine tektonik dokanakla serpantinit, yastık lavlar, metabazit, metatüf, metakırıntılı matriksli, mermer, şist, metaçört, kalkışist, metadolerit blokları içeren ofiyolitli karışık ve bunun da üzerine tektonik dokanakla serpantinit, peridotit, gabro ve dolerit dayklarından oluşan ofiyolitik seri gelmektedir. Altnekin Metamorfittlerinin en üst düzeylerini ise ofiyolitik serinin üzerine uyumsuz olarak gelen kahve-kırmızı ve sarı renkli kırıntılı kayaçlar oluşturmaktadır (Karaman, 1986; Özgül ve Göncüoğlu, 1999; Eren, 2003).

Yöredeki otokton ve allohton özellikli bütün kayalar Alpin orojenik olayları ile metamorfizmaya ve çok evreli kıvrımlanmaya uğramışlardır. Bu olaylar büyük bir olasılıkla İç Toros Okyanusu'nun Geç Kretase-Geç Eosen arasındaki kapanmasına bağlı olarak gerçekleşmiştir (Okay 1986; Eren, 1993; Eren ve Kurt 2000, Eren 2001).

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Kıvrımlar çok farklı şekillerde sınıflandırılmakta olup bu çalışmada eğim izogonlarına (Ramsay, 1967) ve kanatlar arasındaki açıya (Fleuty, 1964) göre yapılan geometrik kıvrım sınıflamaları kullanılmıştır.

Eğim izogonlarına göre sınıflamada kıvrımlanmış tabakaların kıvrım eksenine dik kesitindeki profil görünüşleri kullanılarak, kıvrımlı tabakanın alt ve üst yüzeyindeki aynı eğime sahip noktaların birleştirilmesiyle elde edilen eğim izogonlarının (eş eğim çizgileri) birbirlerine göre konumları yorumlanmaktadır (Ramsay, 1967). Eğim izogonlarına göre yapılan sınıflamada, eksen zonundaki kalınlıklar (T_0 ve t_0), kıvrımlanmış tabaka yüzeyleri arasındaki eksen düzlemine paralel kalınlık (T_α), kıvrımlanmış tabakanın alt ve üst yüzeyi arasındaki dik kalınlık (t_α) ve eğim açısı (α) parametreleri kullanılmaktadır (Şekil 3A). Eğim izogonlarına bağlı olarak Ramsay (1967) tarafından üç temel kıvrım sınıflanmıştır; 1) Yaklaşan eğim izogonlu kıvrımlar (Sınıf 1, 2) Paralel izogonlu kıvrımlar (Sınıf 2 ve 3) Uzaklaşan izogonlu kıvrımlar (Sınıf 3) (Şekil 3B).

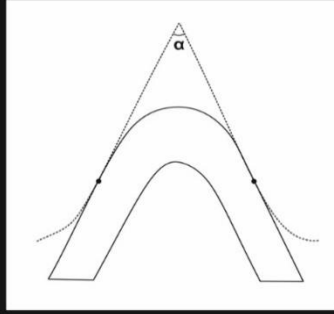


Şekil 3. A) Kıvrım Profili (Ramsay, 1967). $T_0=t_0$: Eksen zonundaki kalınlık, T_α : Kıvrımlanmış tabakanın alt ve üst yüzeyleri arasındaki eksen düzlemine paralel kalınlık, t_α : Kıvrımlanmış tabakanın yüzeyleri arasındaki dik kalınlık, α : eğim açısı. B) Eğim izogonlarına göre temel kıvrım tipleri (Ramsay, 1967). C) Dikey kalınlık grafiği (Ramsay, 1967). D) Yassılmış paralel kıvrım (Ramsay,1967), a: Paralel kıvrımdan yassılmış kıvrıma geçişi gösterir, b: Sınıf 1C (yassılmış kıvrım) türü kıvrımların yassılma miktarlarını ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) gösterir abak, $t'_\alpha = t_\alpha/t_0$: Eğim açısının değişimine bağlı olarak dikey kalınlığın değişimi bağıntısı, α : Eğim açısı.

Figure 3. A) Fold Profile (Ramsay, 1967). $T_0=t_0$: thickness at the fold hinge, T_α : Thickness parallel to axial surface, t_α : Orthogonal thickness, α : Angle of dip. B) The main types of folds based on dip isogons (Ramsay, 1967). C) The orthogonal thickness graphs of folds (Ramsay,1967). D) The flattening fold (Ramsay,1967), a: Projection of the transition from parallel fold to flattened fold, b: Curves of flattening ratios ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) for Class 1C (flattened fold) type folds, $t'_\alpha = t_\alpha/t_0$: Orthogonal thickness variation based on angle of dips, α : Angle of dips.

T_0 , t_0 , T_α , t_α ve α parametrelerine bağlı olarak, kıvrım boyunca kıvrımlanan yüzeyin eğim açısının değişimine bağlı olarak dikey kalınlığın değişimi bağıntısı $t'_\alpha = t_\alpha/t_0$ ve eksen yüzeyine paralel kalınlık değişimi bağıntısı $T'_\alpha = T_\alpha/T_0$ hesaplanmaktadır (Ramsay, 1967). Elde edilen t'_α değeri ile kıvrıma ait eğim açısının değişimine bağlı kanatlardaki dikey kalınlık grafikleri hazırlanabilmekte ve elde edilen grafik üzerinden de kıvrım sınıfları belirlenebilmektedir (Şekil 3C). Yassılmış paralel kıvrımlarda (sınıf 1C) kanatlarda yassılması ve eksen yüzeyi boyunca eşit oranda uzama gerçekleşmektedir (Şekil 3D). Yassılmış paralel kıvrımlardaki deformasyon elipsi uzun eksenini (λ_1) ve deformasyon elipsi kısa eksenini (λ_2) verilerine göre yassılma miktarı/deformasyon oranı ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) ve/veya ($\sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$) ise Ramsay (1967) tarafından hazırlanan abak yardımıyla belirlenebilmektedir (Şekil 3D).

Bu çalışmada kullanılan bir diğer kıvrım sınıflama yöntemi de Fleuty (1964) tarafından önerilen kıvrım kanatları arasındaki açıya bağlı olarak yapılan sınıflamadır. Fleuty (1964) sınıflandırmasında kıvrımlar, kıvrımın kanatları arasındaki açıya göre sınıflandırılmaktadır (Şekil 4).

	Kanatlar arası açı (α°)	Kıvrım Tipi
	$\alpha: 180 - 120$	Çok açık (geniş) kıvrım
	$\alpha: 120 - 70$	Açık kıvrım
	$\alpha: 70 - 30$	Dar kıvrım
	$\alpha: 30 - 10$	Sıkışık kıvrım
	$\alpha: 10 - 0$	İzoklinal kıvrım

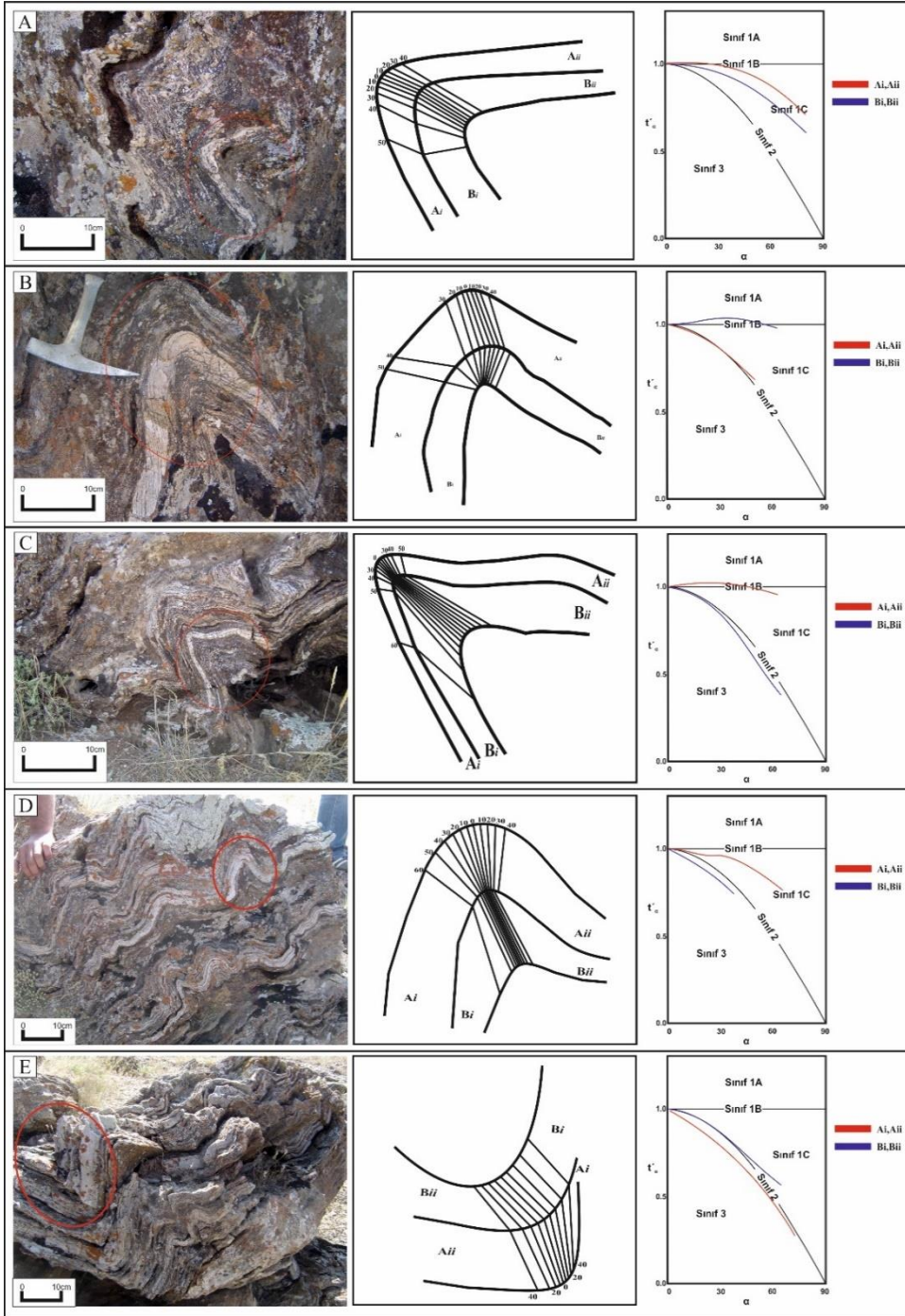
Şekil 4. Kanatlar arasındaki açıya göre kıvrım sınıflandırması (Fleuty, 1964).

Figure 4. Classification of the folds based on interlimb angle (Fleuty, 1964).

Bu çalışmadaki Ramsay (1967) ve Fleuty (1964) kıvrım sınıflamaları için kıvrımların arazide çekilen fotoğrafları ve araziden derlenen el örneklerinin kıvrım eksenine dik çekilen fotoğrafları üzerinden kıvrımların şematik resimleri hazırlanmış ve sınıflamalar için gerekli parametreler bu şematik resimler üzerinde çalışılarak elde edilmiştir (Akbaş, 2013). Bu kapsamda Altnekin bölgesinde arazide çekilen 28 farklı fotoğraf üzerinden 36 kıvrımın ve araziden derlenen örneklerden ise 16 kıvrımın şematik resimleri elde edilmiştir (Şekil 5). Meram-Dereköy bölgesindeki Hatip Ofiyolitli Karışığı içindeki çörtlü-kireçtaşı bloklarındaki kıvrımların 16 farklı lokalitede çekilen fotoğrafları üzerinden 18 kıvrımın şematik resimleri elde edilmiştir (Şekil 6). Sarayönü bölgesindeki kıvrımlardan ise aynı şekilde 16 farklı lokalitedeki kıvrımların arazi fotoğraflarından 18 kıvrımın ve araziden derlenen örneklerden ise 5 kıvrımın şematik resimleri elde edilmiştir (Şekil 7).

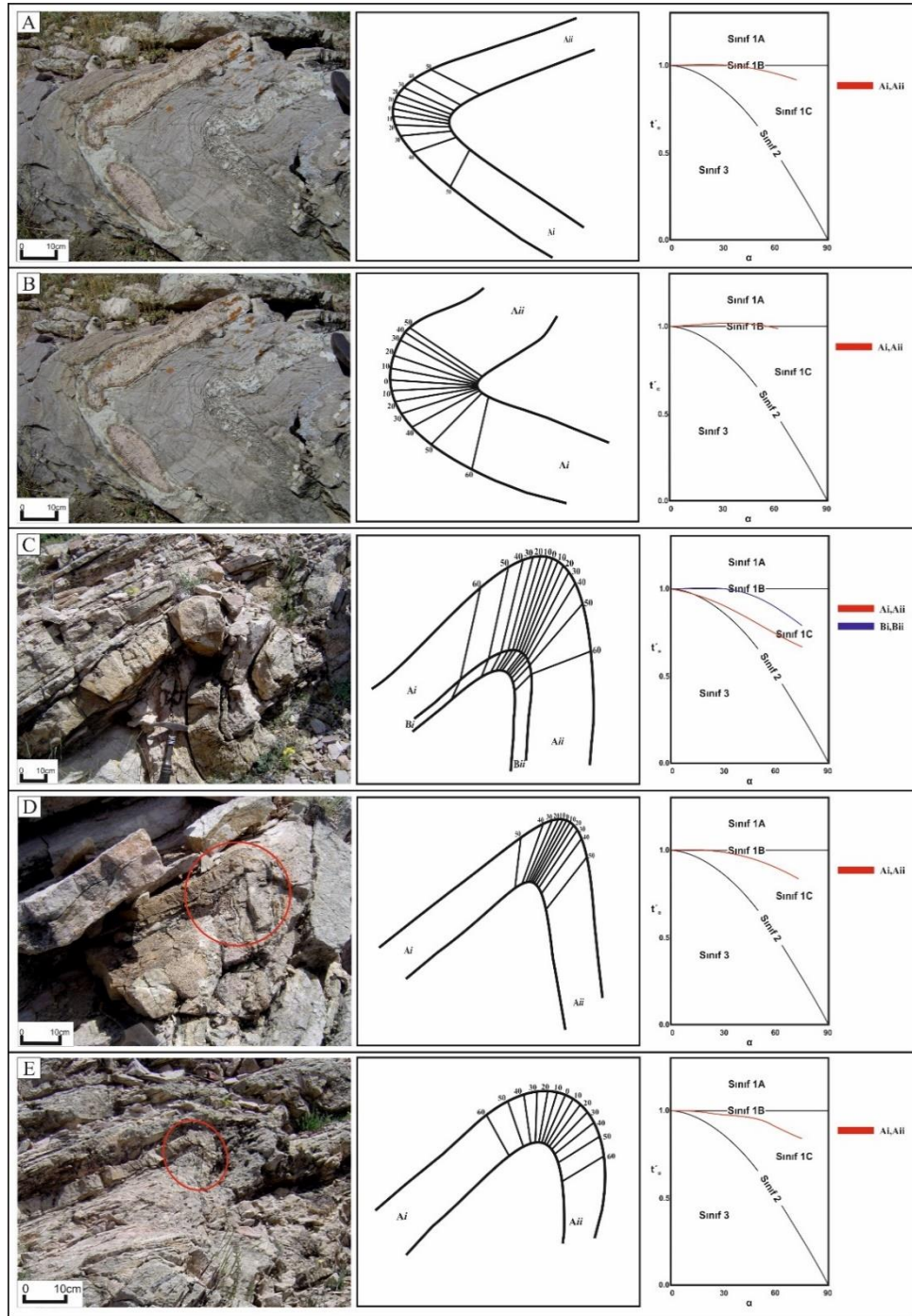
KIVRIM ANALİZİ (ANALYSIS OF FOLD)

Bu çalışma kapsamında Altnekin, Sarayönü ve Meram-Dereköy bölgelerindeki farklı özellikte deforme olmuş ve kıvrılmış birimler geometrik olarak sınıflandırılmıştır.



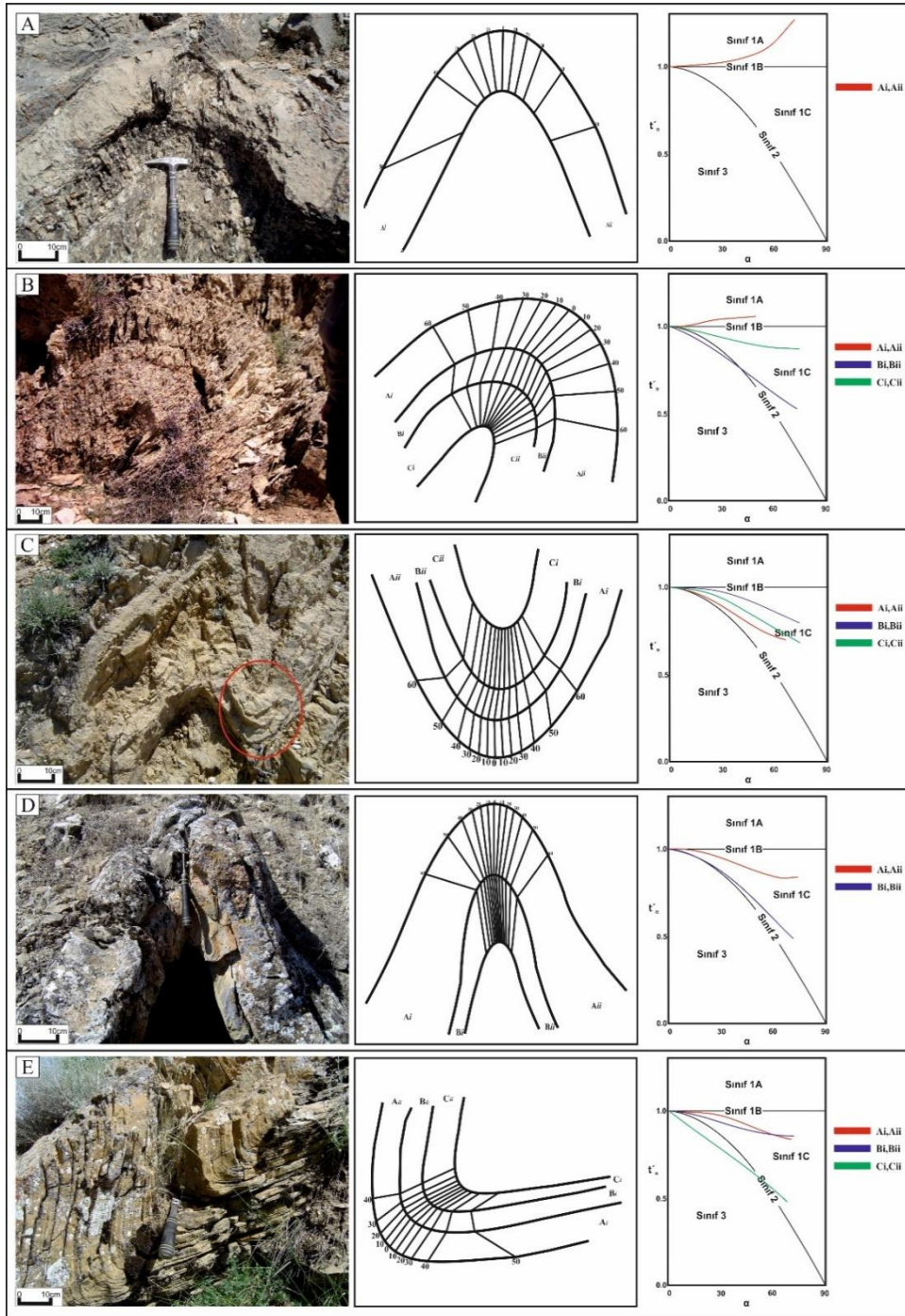
Şekil 5. Altın regionindeki kıvrımların profilden çekilen fotoğrafları, izogonların çizimi ve dikey kalınlık grafikleri. A_i , A_{ii} , B_i , B_{ii} vd.: Her bir tabakaya verilen ad. A) ALT-1, sınıf1C; B) ALT-2, sınıf 2-sınıf1A; C) ALT-3, sınıf 1A-sınıf3; D) ALT-4, sınıf1C-sınıf3; E) ALT-5, sınıf3-sınıf2.

Figure 5. Profile photos of the folds, drawing of isogons and the orthogonal thickness graphs of folds in the Altın region. A_i , A_{ii} , B_i , B_{ii} etc.: Name of the each beds of the folds. A) ALT-1, class1C; B) ALT-2, class2-class1A; C) ALT-3, class1A-class3; D) ALT-4, class1C-class3; E) ALT-5, class3-class2.



Şekil 6. Meram-Dereköy bölgesindeki kıvrımların profilden çekilen fotoğrafları, izogonların çizimi ve dikey kalınlık grafikleri. Ai, Aii, Bi, Bii vd.: Her bir tabakaya verilen ad. A) MD-1, sınıf1C; B) MD-2, sınıf1A; C) MD-3, sınıf1C; D) MD-4, sınıf 1C; E) MD-5, sınıf1C.

Figure 6. Profile photos of the folds, drawing of isogons and the orthogonal thickness graphs of folds in the Meram-Dereköy region. Ai, Aii, Bi, Bii etc.: Name of the each beds of the folds. A) MD-1, class1C; B) MD-2, class1A; C) MD-3, class1C; D) MD-4, class1C; E) MD-5, class1C.



Şekil 7. Sarayönü bölgesindeki kıvrımların profilden çekilen fotoğrafları, izogonların çizimi ve dikey kalınlık grafikleri. Ai, Aii, Bi, Bii vd.: Her bir tabakaya verilen ad. A) SRY-1, sınıf 1A; B) SRY-2, sınıf1A-sınıf2-sınıf1C; C) SRY-8, sınıf1C; D) SRY-9, sınıf1C; E) SRY-12, sınıf1C-sınıf3.

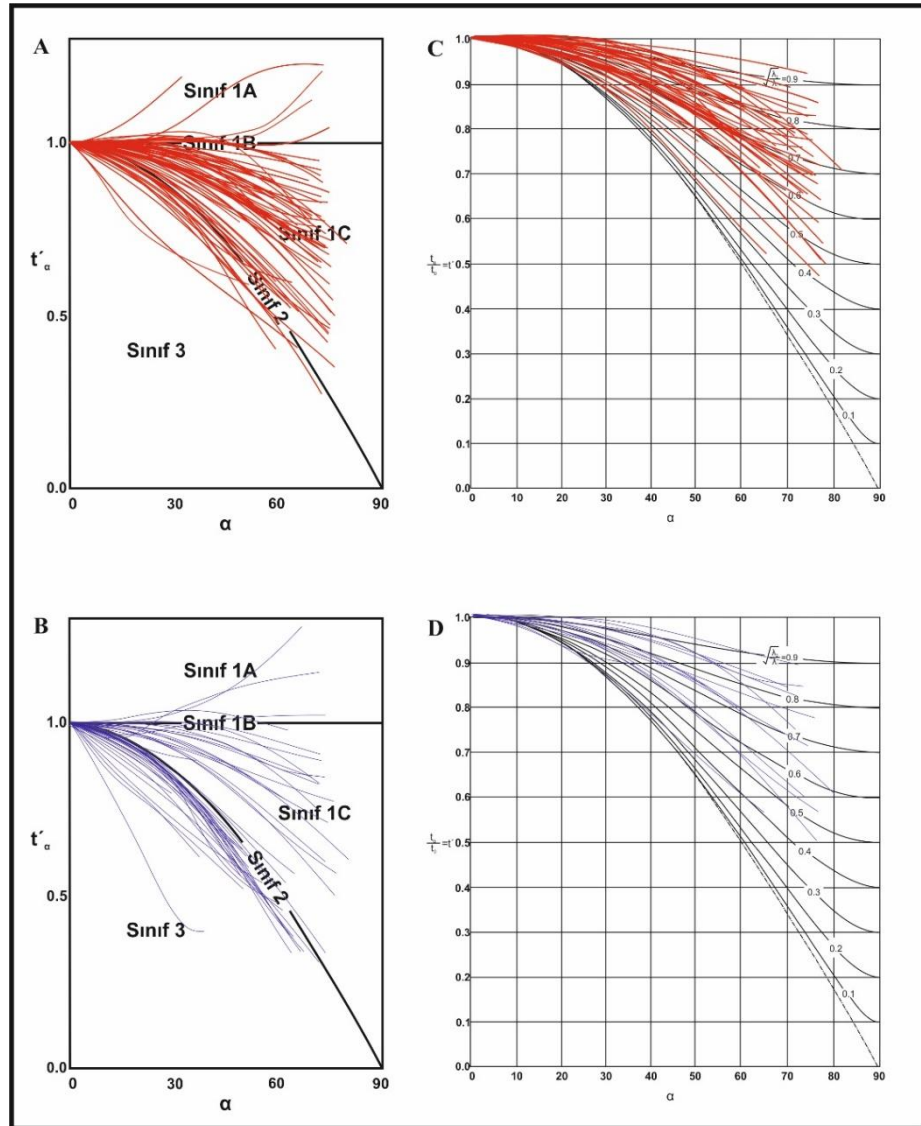
Figure 7. Profile photos of the folds, drawing of isogons and the orthogonal thickness graphs of folds in the Sarayönü region. Ai, Aii, Bi, Bii etc.: Name of the each beds of the folds. A) SRY-1, class1A; B) SRY-2, class1A-class2-class1C; C) SRY-8, class1C; D) SRY-9, class1C; E) SRY-12, class1C-class3.

Altnekin Bölgesi (Altnekin Region)

Altnekin bölgesinde toplamda 52 kıvrım üzerinde yapılan eğim izogonları sınıflamalarına göre, çok evreli kıvrımların kompetent tabakalarının, egemen olarak sınıf 1C, inkompetent tabakalarının ise sınıf 3 veya sınıf 2 türü kıvrımlar olduğu belirlenmiş olup inkompetent tabakaların kompetent tabakalara

nazaran daha fazla yassı oldukları görülmektedir (Şekil 8A, B). Sınıf 1C olan kompetent tabakalar için $\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ değeri 0.4-0.8 arasında, $\sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$ 1.1-2.5 arasında değişmektedir (Şekil 8C). Buna karşın inkompetent tabakaların yassılma oranının ($\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$) 0.3-0.8 aralığında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 8D). Aynı kıvrım içerisinde sınıf 1C olan kompetent ve inkompetent tabakalarda da inkompetent tabakaların kompetent tabakalara oranla daha fazla yassı olduğu görülmektedir. Bölgedeki 1. evre kıvrımlarında ise kompetent tabakaların sınıf 2 veya sınıf 3 türü kıvrım oldukları belirlenmiştir.

Altınekin bölgesindeki Fleuty (1964) kıvrım sınıflamasına göre kıvrımlar dar kıvrım, açık kıvrım ve sıkışık kıvrım olarak sınıflanmıştır (Çizelge 1). Yassılma oranının 0.6-0.9 aralığında olduğu düşük-orta derece yassılmış kıvrımların dar kıvrım veya açık kıvrım olarak geliştiği görülmüştür. Yüksek oranda yassılmış olan 0.4-0.6 aralığında $\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ değerine sahip kıvrımların ise sıkışık kıvrım olarak geliştiği görülmektedir.



Şekil 8. Altınekin bölgesindeki 52 adet kıvrımın dikey kalınlık ve yassılma oranı grafikleri. A) Kompetent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. B) İnkompetent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. C) Kompetent tabakalara ait yassılma oranı grafiği. D) İnkompetent tabakalara ait yassılma oranı grafiği.

Figure 8. The orthogonal thickness graphs and the flattening ratios graphs of folds in Altınekin region. A) The orthogonal thickness graphs of the competent beds. B) The orthogonal thickness graphs of the incompetent beds. C) The flattening ratios graphs of the competent beds. D) The flattening ratios graphs of the incompetent beds.

Çizelge 1. Altnekin bölgesinin Fleuty sınıflamasına göre kıvrım türleri.*Table 1. Fold types of Altnekin region based on Fleuty classification.*

Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi	Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi
ALT-1	A-B	68-64	Dar Kıvrım	ALT-27	A	31	Dar Kıvrım
ALT-2	A-B	95-86	Açık Kıvrım	ALT-28	A-B-C	30-58-37	Sıkışık Kıvrım-Dar Kıvrım
ALT-3	A-B	65-63	Dar Kıvrım	ALT-29	A-B-C	59-64-60	Dar Kıvrım
ALT-4	A-B	53-57	Dar Kıvrım	ALT-30	A-B-C	22-32-61	Sıkışık Kıvrım-Dar Kıvrım
ALT-5	A-B	73-100	Açık Kıvrım	ALT-31	A	60	Dar Kıvrım
ALT-6	A-B-C	60-59-60	Dar Kıvrım	ALT-32	A	79	Açık Kıvrım
ALT-7	A-B	67-66	Dar Kıvrım	ALT-33	A-B-C	31-26-27	Dar Kıvrım-Sıkışık Kıvrım
ALT-8	A-B-C	89-94-105	Açık Kıvrım	ALT-34	A-B-C	62-69-74	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım
ALT-9	A-B	50-46	Dar Kıvrım	ALT-35	A-B-C	59-49-67	Dar Kıvrım
ALT-10	A-B	50-69	Dar Kıvrım	ALT-36	A	34	Dar Kıvrım
ALT-11	A-B	54-77	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım	ALT-37	A-B	50-44	Dar Kıvrım
ALT-12	A-B-C	79-92-86	Açık Kıvrım	ALT-38	A-B	108-103	Açık Kıvrım
ALT-13	A-B	47-50	Dar Kıvrım	ALT-39	A-B	47-48	Dar Kıvrım
ALT-14	A-B	44-49	Dar Kıvrım	ALT-40	A-B	48-51	Dar Kıvrım
ALT-15	A-B	67-60	Dar Kıvrım	ALT-41	A-B	70-95	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım
ALT-16	A-B-C	94-123-72	Açık Kıvrım	ALT-42	A-B-C	50-45-45	Dar Kıvrım
ALT-17	A-B-C	70-91-98	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım	ALT-43	A	70	Dar Kıvrım
ALT-18	A-B-C-D-E	85-65-77-55-57	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-44	A-B	60-44	Dar Kıvrım
ALT-19	A-B	90-65	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-45	A	70	Dar Kıvrım
ALT-20	A-B-C-D	74-70-87-80	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-46	A-B-C	70-70-73	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım
ALT-21	A-B-C-D	71-78-74-68	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-47	A	60	Dar Kıvrım
ALT-22	A-B-C-D	100-85-71-68	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-48	A-B	98-97	Açık Kıvrım
ALT-23	A-B-C-D-E-F-G-H	97-93-100-91-97-94	Açık Kıvrım	ALT-49	A	46	Dar Kıvrım
ALT-24	A-B	99-110	Açık Kıvrım	ALT-50	A-B	70-83	Dar Kıvrım-Açık Kıvrım
ALT-25	A-B-C-D	44-40-52-58	Dar Kıvrım	ALT-51	A-B	46-55	Dar Kıvrım
ALT-26	A-B-C-D-E	83	Açık Kıvrım-Dar Kıvrım	ALT-52	A	56	Dar Kıvrım

Meram-Dereköy Bölgesi (Meram-Dereköy Region)

Meram-Dereköy bölgesinde yer alan 18 adet kıvrımın şematik resimleri üzerinde yapılan izogonal sınıflamalarda kompetent tabakaların egemen olarak sınıf 1C türü kıvrım olarak geliştikleri görülmektedir (Şekil 9A). Az sayıda analiz edilebilen inkompetent tabakaların ise egemen olarak sınıf 3 türü kıvrım olarak geliştikleri belirlenmiştir (Şekil 9B). Sınıf 1C türü olan kıvrımların orta düşük derecede bir yassılma gösterdikleri ve ortalama 0.5-0.8 aralığında $\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ ve 1.1-2.0 aralığında $\sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$ değerine sahip oldukları görülmektedir (Şekil 9C).

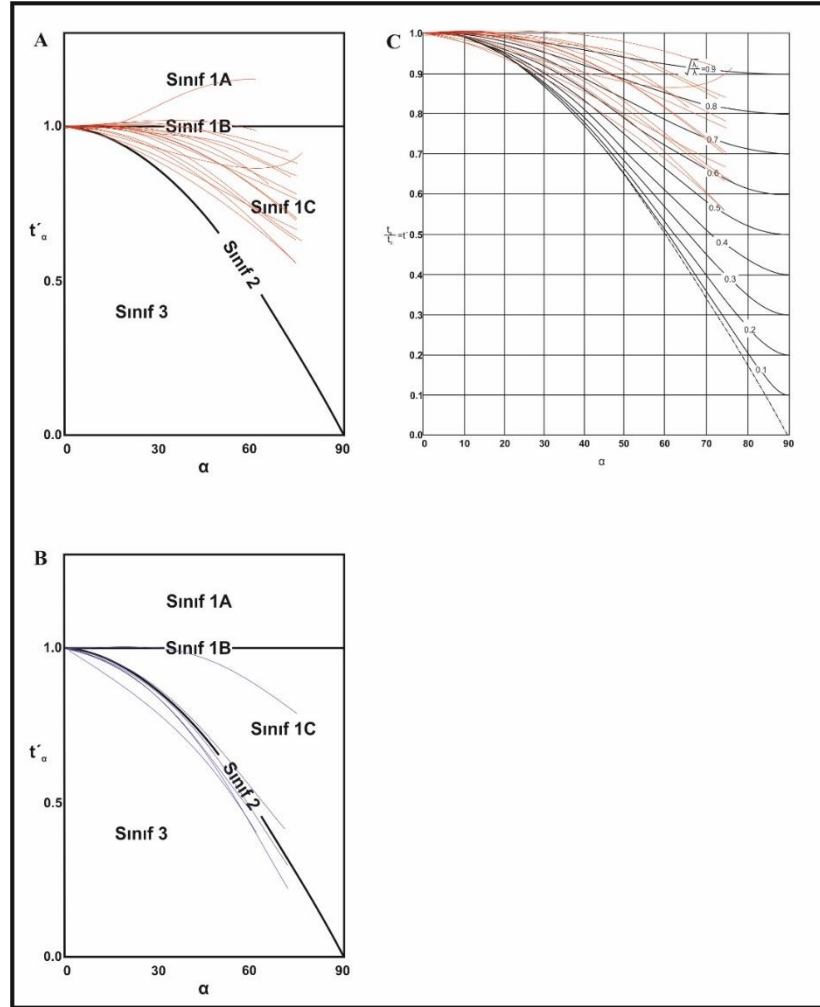
Meram-Dereköy bölgesindeki kıvrımlar için yapılan Fleuty (1964) kıvrım sınıflamasına göre kıvrımlar dar kıvrım, açık kıvrım ve sıkışık kıvrım olarak tanımlanmıştır (Çizelge 2). Yassılma oranının 0.7-0.9

aralığında olduğu ve düşük-orta derece yassılmış kıvrımların dar kıvrım olarak geliştiği, yüksek oranda yassılmış kıvrımların ise sıkışık kıvrım olarak geliştiği belirlenmiştir.

Sarayönü Bölgesi (Sarayönü Region)

Sarayönü çalışma alanında arazide yerinde (18 adet) ve derlenen örneklerde (5 adet) belirlenen kıvrımlar için yapılan izogonal sınıflamalarda kompetent tabakaların egemen olarak sınıf 1C türü kıvrım olarak geliştikleri, inkompetent tabakaların ise daha fazla deforme olarak sınıf 3 veya sınıf 2 türü kıvrımlar olarak geliştikleri görülmektedir (Şekil 10A, B). Sınıf 1C türü olan kıvrımların dar bir aralıkta bir yassılma gösterdikleri ve ortalama 0.7-0.9 aralığında $\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$ değerine ve 1.1-1.0 aralığında $\sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$ değerine sahip oldukları belirlenmiştir (Şekil 10C, D).

Sarayönü bölgesindeki yapılan Fleuty (1964) kıvrım sınıflamasına göre kıvrımlar dar kıvrım ve açık kıvrım olarak sınıflanmıştır (Çizelge 3). Yassılma oranının 0.7-0.9 aralığında olduğu düşük-orta derece yassılmış kıvrımların dar kıvrım olarak geliştiği, daha az oranda yassılmış kıvrımların ise açık kıvrım olarak geliştiği belirlenmiştir.



Şekil 9. Meram-Dereköy bölgesindeki 18 adet kıvrımın dikey kalınlık ve yassılma oranı grafikleri. A) Kompetent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. B) İnkompetent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. C) Kompetent tabakalara ait yassılma oranı grafiği.

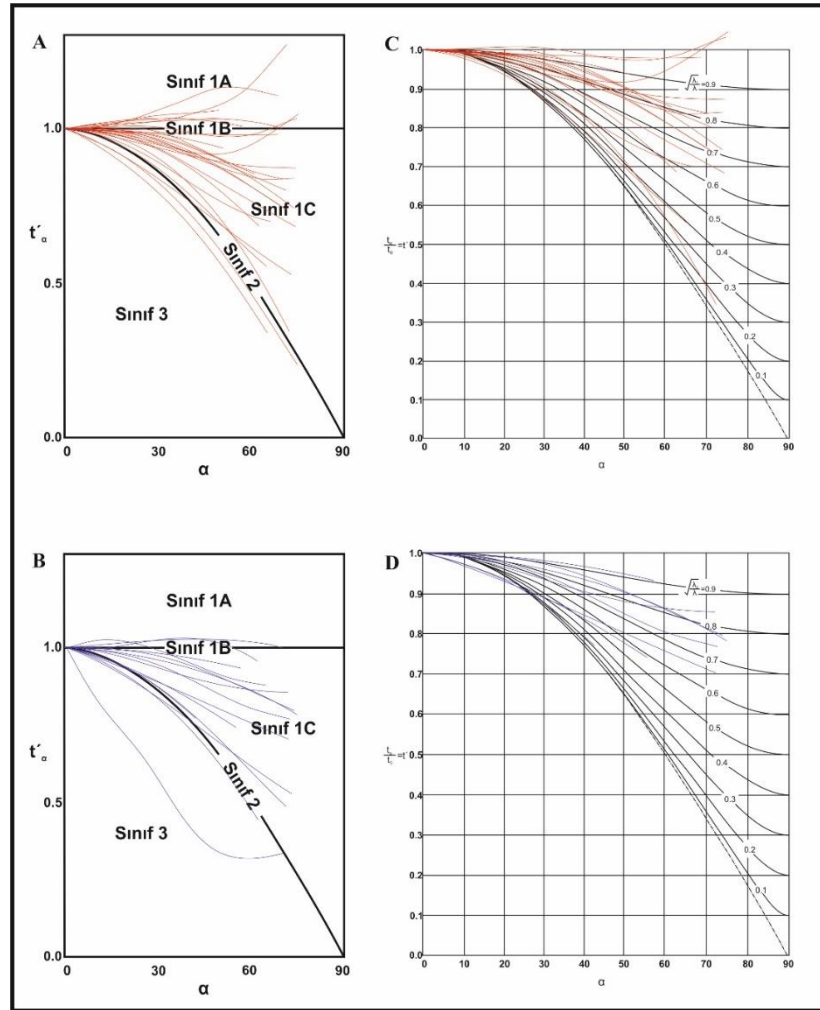
Figure 9. The orthogonal thickness graphs and the flattening ratios graphs of folds in Meram-Dereköy region. A) The orthogonal thickness graphs of the competent beds. B) The orthogonal thickness graphs of the incompetent beds. C) The flattening ratios graphs of the competent beds.

Çizelge 2. Meram-Dereköy bölgesinin Fleuty sınıflamasına göre kıvrım türleri.*Table 2. Fold types of Meram-Dereköy region based on Fleuty classification.*

Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi	Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi
MD-1	A	70	Dar Kıvrım	MD-10	A	26	Sıkışık Kıvrım
MD-2	A	44	Dar Kıvrım	MD-11	A	60	Dar Kıvrım
MD-3	A-B	49-46	Dar Kıvrım	MD-12	A-B	20-18	Sıkışık Kıvrım
MD-4	A	68	Dar Kıvrım	MD-13	A	36	Dar Kıvrım
MD-5	A	43	Dar Kıvrım	MD-14	A	61	Dar Kıvrım
MD-6	A	37	Dar Kıvrım	MD-15	A	37	Dar Kıvrım
MD-7	A	44	Dar Kıvrım	MD-16	A-B	59-59	Dar Kıvrım
MD-8	A-B	41-37	Dar Kıvrım	MD-17	A-B	29-41	Sıkışık Kıvrım
MD-9	A	37	Dar Kıvrım	MD-18	A-B	23-26	Sıkışık Kıvrım

Çizelge 3. Sarayönü bölgesinin Fleuty sınıflamasına göre kıvrım türleri.*Table 3. Fold types of Sarayönü region based on Fleuty classification.*

Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi	Örnek No	Tabaka	α°	Kıvrım Tipi
SRY-1	A	85	Açık Kıvrım	SRY-13	A	29	Sıkışık Kıvrım
SRY-2	A-B-C	72-76-80	Açık Kıvrım	SRY-14	A	59	Dar Kıvrım
SRY-3	A-B	41-48	Dar Kıvrım	SRY-15	A-B-C	32-35-31	Dar Kıvrım
SRY-4	A	110	Açık Kıvrım	SRY-16	A-B	21-17	Sıkışık Kıvrım
SRY-5	A-B	96-97	Açık Kıvrım	SRY-17	A-B-C	62-64-69	Dar Kıvrım
SRY-6	A	105	Açık Kıvrım	SRY-18	A	70	Dar Kıvrım
SRY-7	A	57	Dar Kıvrım	SRY-19	A-B-C-D	93-89-90-78	Açık Kıvrım
SRY-8	A-B-C	60-60-65	Dar Kıvrım	SRY-20	A-B	105-92	Açık Kıvrım
SRY-9	A-B	60-37	Dar Kıvrım	SRY-21	A	62	Dar Kıvrım
SRY-10	A-B-C-D	77-88-81-78	Açık Kıvrım	SRY-22	A-B	87-97	Açık Kıvrım
SRY-11	A-B	78-74	Açık Kıvrım	SRY-23	A-B	65-62	Dar Kıvrım
SRY-12	A-B-C	85-81-80	Açık Kıvrım				



Şekil 10. Sarayönü bölgesindeki 23 adet kıvrımın dikey kalınlık ve yassılma oranı grafikleri. A) Kompetent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. B) İnkompotent tabakalara ait dikey kalınlık grafiği. C) Kompetent tabakalara ait yassılma oranı grafiği. D) İnkompotent tabakalara ait yassılma oranı grafiği.

Figure 10. The orthogonal thickness graphs and the flattening ratios graphs of folds in Sarayönü region. A) The orthogonal thickness graphs of the competent beds. B) The orthogonal thickness graphs of the incompetent beds. C) The flattening ratios graphs of the competent beds. D) The flattening ratios graphs of the incompetent beds.

SONUÇLAR (RESULTS)

Altınekin, Meram-Dereköy ve Sarayönü bölgelerindeki mesoskopik kıvrımlar için geometrik sınıflamalar yapılmıştır. Yapılan geometrik kıvrım sınıflamaları ve bölgenin tektonik evrimi dikkate alındığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1) Çalışma alanlarında yapılan geometrik sınıflamalarla, bölgede yassılmış paralel kıvrımların egemen olduğu ve kompetent tabakaların sınıf 1C, inkompotent tabakaların sınıf 2 ve sınıf 3 türü kıvrımlar oluşturacak şekilde kıvrımlandıkları görülmüştür.

2) Yapılan Fleuty sınıflamasına göre ise yassılma oranlarıyla uyumlu olarak kıvrımların, Altınekin bölgesinde açık, dar ve sıkışık kıvrım, Meram-Dereköy bölgesinde dar, sıkışık kıvrım, Sarayönü bölgesinde ise açık kıvrım, dar kıvrım ve sıkışık kıvrım şeklinde geliştikleri belirlenmiştir.

3) Altınekin bölgesinde gelişen en az 6 evreli deformasyon sonucu gelişen kıvrımların, oluşum mekanizmasına bakıldığında, bölgede YB/DS (Yüksek basınç/düşük sıcaklık) ve daha sonra düşük sıcaklık metamorfizmasıyla bükülme, fleksürel akma, fleksürel kayma mekanizmalarına uygun bir kıvrımlanmanın geliştiği ve ilerleyen deformasyonla birlikte yassılmış kıvrımların geliştiği görülmüştür.

4) Meram-Dereköy bölgesinde gelişen kıvrımlara ait izogonal kıvrım türleri bölgedeki kıvrımların esas olarak bükülme mekanizmasına uygun olarak geliştiğini göstermektedir. Bükülme mekanizması ile oluşan paralel kıvrımların ilerleyen deformasyon ile paralel yassılmış kıvrımlara dönüştüğü görülmüştür.

5) Sarayönü bölgesinde gelişen izogonal kıvrımların ilerleyen deformasyonlarla birlikte fleksürel akma ve kayma mekanizmalarına uygun geliştiği belirlenmiştir. Deformasyon süreçlerinde yassılma devam etmiş ve yassılmış kıvrımlar da gelişmişlerdir.

6) Alanlara göre gelişen kıvrım sınıflarına, kıvrım geometrilerine ve aynı kompetentliğe sahip Sınıf 1C kıvrımlarının yassılma oranlarına bakıldığında, Altnekin Metamorfitlerinin, Meram-Dereköy alanındaki kayaçlara, Meram Dereköy alanındaki kayaçların da Sarayönü alanındakilere göre daha fazla deforme oldukları görülmektedir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

T_0	: Eksen zonundaki kalınlık
t_0	: Eksen zonundaki kalınlık
T_α	: İki kıvrımlanmış yüzey arasındaki eksen düzlemine paralel kalınlık
t_α	: İki kıvrımlanmış yüzey arasındaki dik kalınlık
α	: Eğim açısı
t'_α	: Kalınlığın değişimi bağıntısı
T'_α	: Eksen yüzeyine paralel kalınlık değişimi bağıntısı
λ_1	: Deformasyon elipsi uzun eksen
λ_2	: Deformasyon elipsi kısa eksen
$\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}$: Deformasyon oranı
$\sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$: Deformasyon oranı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akbaş, M., 2013, *Bozdağlar Masifi'ndeki (Konya Kuzeyi) Kıvrımların Geometrik ve Oluşum Mekanizması Açısından Sınıflaması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Akal, C., Candan, O., Koralay, O.E., Oberhänsli, R., Chen, F., Prelević, D., 2012, "Early Triassic potassic volcanism in the Afyon Zone of the Anatolides/Turkey: implications for the rifting of the Neo-Tethys", *International Journal of Earth Sciences*, Vol. 101, No. 1, pp. 177-194.
- Asan, K., Ertürk, M.A., 2013, "First Evidence of Lamprophyric Magmatism from the Konya Region, Turkey: a Genetic Link to High-K Volcanism", *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, Vol. 87, No. 6, pp. 1617-1629.
- Brennich, G., 1954, "1/100 000 ölçekli genel jeolojik harita izahnamesi. Akşehir (90-1, 2, 3, 4) ve Ilgın (91/1 ve 91/3) paftaları", *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü, Derleme Rapor*, Rapor No. 2515.
- Eren, Y., 1993, "Konya kuzeybatısında Bozdağlar Masifinin otokton ve örtü birimlerinin stratigrafisi", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt. 36, ss. 7-23.
- Eren, Y., "Ilgın-Sarayönü (Konya) güneyinde Bozdağlar Masifi'nin Stratigrafisi ve Jeoloji Evrimi", *K.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü 30. Yıl Sempozyumu Bildirileri*, KTÜ, Trabzon, Cilt 1, 694-707, 1996a.
- Eren, Y., 1996b, "Ilgın-Sarayönü (Konya) Güneyinde Bozdağlar Masifi'nin Yapısal Özellikleri", *Türkiye Jeoloji Bülteni*, Cilt 39, Sayı 2, ss. 49-64.
- Eren, Y., 2001; "The Polyphase Alpine Deformation at the Northern Edge of the Menderes-Taurus Block, North Konya, Central Turkey", *Journal of Asian Earth Sciences*, Vol. 19, No. 6, pp. 737-749.
- Eren Y., 2003, "Tuzgölü Havzası Güneybatısındaki (Altnekin-Konya) Temel Kayaçlarının Jeolojisi", *Türkiye Petrol Jeologları Derneği (Haymana-Tuzgölü-Ulukışla Basenleri Uygulamalı Çalışma-Özel sayı)*, Cilt 5, ss. 113-127.
- Eren, Y., Kurt, H., 2000, "The Stratigraphical, Geochemical and Geodynamical Modelling of the Northeast Margin of Menderes-Taurus Block", *S.Ü. Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Vol. 15, No. 1, pp. 26-41.

- Eren, Y., Kurt, H., Rosselet, F., G.M. Stampfli, 2004, "Palaeozoic Deformation and Magmatism in the Northern Area of the Anatolide Block (Konya), Witness of the Palaeotethys Active Margin, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, Vol. 97, No. 2, pp. 293-306.
- Fleuty, M.J., 1964, "The Description of Folds". *Geological Association Proceeding*, Vol. 75, pp. 461-492.
- Göğür, E., Kıralk, K., 1969, "Kızılören dolayının jeolojisi", *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü*, Rapor No. 5204.
- Göncüoğlu, M. C., 2011, "Kütahya-Bolkardağ Kuşağının Jeolojisi", *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, Cilt 142, ss. 227-282.
- Göncüoğlu, M. C., Çapkınoğlu, Ş., Gürsu, S., Noble, P., Turhan, N., Tekin U. K., Okuyucu, C., Göncüoğlu, Y., 2007, "The Mississippian in the Central and Eastern Taurides (Turkey): constraints on the tectonic setting of the Tauride-Anatolide Platform", *Geologica Carpathica*, Vol. 58, No. 5, pp. 427-442.
- Kaaden, G., 1966, "The significance and distribution of glaucophane rocks in Turkey", *Bulletin Mineral Research Exploration Institute of Turkey*, Vol. 67, pp. 37-67.
- Karaman, M.E., 1986, "Altnekin (Konya) çevresinin jeolojisi ve tektonik evrimi", *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Cilt 29, ss. 157-171.
- Ketin, İ, 1966, "Anadolu'nun Tektonik Birlikleri (Tectonic Units of Anatolian Asia Minor)", *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Dergisi*, Cilt 66, ss. 20-34.
- Koç, A., Kaymakçı, N., Van Hinsbergen, D.J., Kuiper, K.F., Vissers, R.L., 2012, "Tectono-Sedimentary evolution and geochronology of the Middle Miocene Altınapa Basin, and implications for the Late Cenozoic uplift history of the Taurides, southern Turkey", *Tectonophysics*, Vol. 532, pp. 134-155.
- Korkmaz-Gençođlu, G., Asan, K., Kurt, H., Morgan, G., 2017. "40Ar/39Ar geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of the Neogene bimodal volcanism in the Yükselen area, NW Konya (Central Anatolia, Turkey)", *Journal of African Earth Sciences*, Vol. 129, pp. 427-444.
- Kurt, H., 1994, *Petrography and Geochemistry of Kadınhanı (Konya) Area, Central Turkey*, PhD Thesis, Glasgow University, UK.
- Kurt, H., 1996, "Geochemical characteristics of the metagneous rocks near Kadınhanı (Konya), Turkey", *Geosound*, Vol. 28, pp. 1-22.
- Kurt, H., 1997, "Petrochemistry of metabasites in the metapelitic rocks of the North of Yükselen (Kadınhanı), Konya". *Selçuk Üniversitesi Dergisi*, Cilt 20, ss. 329-339.
- Niehoff, W., 1961, "1/100 000 ölçekli Akşehir 90/2 paftası, Iğın 91/1, 91/3 ve 91/4 paftaları üzerine yapılan revizyon çalışmaları", *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü*, *Derleme Rapor*, Rapor No. 3387.
- Okay, A.I., 1986, "High Pressure/Low Temperature Metamorphic Rocks of Turkey: in Blueschists and Eclogites", *The Geological Society of America, Memories*, Vol. 164, pp. 338-348.
- Özcan, A., Göncüoğlu, M.C., Turan, N., Uysal, S., Sentürk, K., Işık, A., 1988, "Late Paleozoic evolution of the Kütahya-Bolkardağı belt", *METU Journal of Pure and Applied Science*, Vol. 21, No. 1/3, pp. 211-220.
- Özdamar, Ş., Billor, M.Z., Sunal, G., Esenli, F., Roden, M.F., 2013, "First U-Pb SHRIMP Zircon and 40Ar/39Ar Ages of Metarhyolites From the Afyon-Bolkardağ Zone, SW Turkey: Implications For the Rifting and Closure of the Neo-Tethys", *Gondwana Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 377-391.
- Özgül, N., 1976, "Toroslar'ın bazı temel jeolojik özellikleri", *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, Cilt 19, ss. 65-78.
- Özgül, L., Göncüoğlu M.C., "Koçkaya Metamorfik Kompleksi'nin Metamorfik Evrimi: Batı Orta Anadolu'da YB/DS Metamorfizmalı Tektonik Bir Birim", 52. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bildirileri*, Ankara, 279-286, 1999.
- Ramsay, J.G., 1967, *Folding and Fracturing of Rocks*, McGraw-Hill, New York, U.S.A.
- Robertson, A.H.F., Ustaömer, T., 2009, "Formation of the Late Palaeozoic Konya Complex and Comparable Units in Southern Turkey by Subduction-Accretion Processes: Implications For the Tectonic Development of Tethys in the Eastern Mediterranean Region", *Tectonophysics*, Vol. 473, No. 1-2, pp. 113-148.

- Robertson, A.H.F., Parlak, O., Ustaömer, T., 2009, "Melange Genesis and Ophiolite Emplacement Related to Subduction of the Northern Margin of the Tauride-Anatolide Continent, Central and Western Turkey", *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 311, No. 1, pp. 9-66.
- Robertson, A.H.F., Parlak, O., Ustaömer, T., 2013, "Late Palaeozoic-Early Cenozoic Tectonic Development of Southern Turkey and the Easternmost Mediterranean Region: Evidence From the Inter-Relations of Continental and Oceanic Units", *Geological Society, London, Special Publications*, Vol. 372, No. 1, pp. 9-48.



BETONARME BİR BİNANIN EŞDEĞER DEPREM YÜKÜ YÖNTEMİ İLE DBYBHY 2007 VE TBDY 2018 YÖNETMELİKLERİNE GÖRE ANALİZİ

¹Mahmud Sami DÖNDÜREN , ²Şeyda HAVA , ³Ali Serdar ECEMİŞ 

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Konya, Türkiye

³Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Konya, Türkiye

¹msdonduren@ktun.edu.tr, ²seydahava@hotmail.com, ³asecemis@erbakan.edu.tr

(Geliş/Received: 24.01.2021; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.03.2021)

ÖZ: Aktif bir deprem kuşağında bulunan ülkemizde meydana gelen depremler sonucunda çok fazla can ve mal kayıpları yaşanmaktadır. Bu doğrultuda depreme dayanıklı yapı kalitesinin artırılması için gerekli kurallar ve standartlar deprem yönetmelikleri şeklinde ortaya çıkmıştır. Çıkarılan deprem yönetmelikleri teknolojinin gelişmesi, deprem alanında bilgi birikiminin artması sonucu belirli zamanlarda revize edilmektedir. Son çıkarılan yönetmelik; 18 Mart 2018 yılında resmi gazetede yayınlanan ve 1 Ocak 2019 yılından itibaren kullanılmaya başlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY 2018)' dir.

Bu çalışmada TBDY 2018 ile (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği) DBYBHY 2007 (Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik) yönetmelikleri arasındaki farklılıklar ve benzerlikler karşılaştırılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde deprem ve deprem etkisi sonucu yapılarda meydana gelen hasarlar incelenmiştir. Sonraki bölümlerinde DBYBHY 2007 ile TBDY 2018 yönetmelikleri deprem hesabı açısından kıyaslanmış, seçilen modeller üzerinde sayısal olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda çerçevesiz ve perdeli-çerçevesiz taşıyıcı sisteme sahip, bodrumlu ve bodrumsuz şekilde seçilen modeller analiz edilmiştir. Modellerin İstanbul ve Konya' da olduğu, Z1-ZA ve Z3-ZD olmak üzere iki farklı yerel zemin sınıfına sahip olduğu kabulü yapılmıştır. Seçilen modeller için TBDY 2018 ile DBYBHY 2007' ye göre ayrı ayrı deprem analizleri yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yapılan çalışmada TBDY 2018 ile kat deplasmanlarında artış gözlenirken kat kesme kuvvetlerinde genellikle bir azalma olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deprem analizi, Türkiye bina deprem yönetmeliği, eşdeğer deprem yükü

An Analysis According to Regulation of DBYBHY 2007 and TBDY 2018 By Equivalent Earthquake Load Method of A Reinforced Concrete Building

ABSTRACT: Turkey is located at high-risk seismic region. As a result of earthquakes happened in our country, loss of life and property were encountered. For this reason seismic standards and design codes were prepared. These standards have been revised depending to technological development and increment in seismic know-how during time. The last seismic code; Turkish Building Seismic Code 2018; was published in official gazette at 18 March 2018 and come into force at 01 January 2019.

In this study; the differences and similarities between 2007 and 2018 Turkish Seismic Codes were compared. In the first part of the study seismic damages were investigated, afterwards the 2007-2018 codes were compared according to Equivalent Lateral Earthquake Load method and numerical comparisons were made on selected analysis building models. In accordance with this purpose a sample analysis building model having framed and wall-framed structural system with / without basement were selected

at two locations (Konya and İstanbul) and at two soil classes (Z1-ZA and Z3-ZD) and analysed. The analysis results were compared. As a result, TBDY 2018 concluded an increase in floor displacements and a decrease in floor shearing forces.

Key Words: *Seismic analysis, Turkish Building Seismic Code, Equivalent Seismic Load*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Depremler tüm dünyada büyük can ve mal kaybının yaşandığı doğal afetlerdir. Dünyada her yıl birçok büyük deprem meydana gelmektedir. Ülkemiz coğrafi konum olarak aktif bir deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır ve ülkemizde meydana gelen depremler sonucunda çok fazla can ve mal kaybı yaşanmaktadır. Deprem sonrası meydana gelen can ve mal kayıplarından dolayı yapı projelendirme ve inşasına kurallar getirilmeye gerek duyulmuştur. Bu kurallar deprem yönetmelikleri şeklinde ortaya konulmuştur.

Gün geçtikçe özellikle deprem kuşağında bulunan ülkelerde depreme dayanıklı yapı tasarımına daha fazla önem verilmeye başlanmıştır. Türkiye topraklarının büyük bir kısmının deprem bölgesinde yer almasından dolayı yapıların depreme dayanıklı, standartlara uygun tasarlanması büyük önem arz etmektedir. Yapıların depreme dayanıklı şekilde yapılması için çıkartılan deprem yönetmelikleri zamanla gereksinimleri karşılayamadığı için revize edilmeleri gerekmektedir.

1975 yılından bu yana yapı tasarımında deprem yönetmelikleri kullanılmıştır. 2007 yılında yürürlüğe giren DBYBHY, 2007 yönetmeliğinin yerini 18 Mart 2018 tarihinde yürürlüğe giren 01.01.2019 tarihinden itibaren kullanılması zorunlu olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) yönetmeliği almıştır. TBDY 2018 son yıllarda meydana gelen gelişmeleri, zamanla daha karmaşık bir hal alan ihtiyaçları karşılama doğrultusunda depreme dayanıklı bina tasarımını uygulamaya aktarmak adına hazırlanmıştır.

TDY 2007 yönetmeliği; mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi amacı ile yeni eklenen bir bölüm ve çelik binalar bölümünde yapılan değişiklikler bir kenara bırakıldığında 1997 yılında çıkarılmış deprem yönetmeliğinden 21 yıl sonra ilk defa yenilenmektedir. Bu geçen sürede mühendislik alanında yapılan çalışmaların artması, bina teknolojisinde meydana gelen gelişmeler, depremin yapı üzerindeki etkisinin, deprem anında taşıyıcı sistem elemanlarının gerçeğe daha yakın halde belirlenebilmesi, bu bağlamda yüksek binaların daha da yaygınlaşması böyle bir yönetmelik değişikliğinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Deprem anında yapının ayakta kalmasını sağlayarak can kaybını ve olası felaketleri engellemek bu güncel yönetmelikleri iyi bir şekilde anlayıp uygulamaya geçirmekle mümkündür. Bunu yapabilmek inşaat mühendislerinin en büyük sorumluluklarından biridir.

Deprem yönetmeliklerini daha iyi anlamak ve uygulamak adına literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda; Kırklareli' nde seçilen dört katlı bir yapı farklı zemin sınıfları için TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre deprem analizi yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır (Keskin ve diğ.,2018). Benzer şekilde TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerinin hesap ve tasarım esaslarındaki benzerlik ve farklılıklar incelenerek bunların tasarımda ortaya çıkardığı etkiler Sapanca' da seçilen örnek bir bina modelinde analiz edilerek TBDY 2018' de TDY 2007' ye kıyasla oluşan farklılıkların yapı elemanlarının tasarımında yapacağı etkiler araştırılmıştır (Tunç ve diğ.,2016). Bir diğer çalışmada çelik yapı tasarımındaki yenilikleri incelemek adına iki adet çelik yapı TBDY 2018 gereklilikleri dikkate alınarak tasarlanıp analiz edilmiştir. Tasarım aşamasında TDY 2007 ile karşılaştırma yapılarak sonuçlar irdelenmiştir (Zorlu ve diğ., 2017). Bu çalışmalarda olduğu gibi TDY 2007' ye göre TBDY 2018 yönetmeliğinin getirdiği yeniliklerin ve farklılıkların incelendiği, farklı taşıyıcı sistemler ve parametreler esas alınarak seçilen yapı sistemlerinin analiz edilip sonuçlarının değerlendirildiği benzer çalışmalar (Erdem ve diğ., 2017, Demir ve diğ., 2017, Öztürk, 2018, Öztürk ve diğ., 2017, Sürmeli, 2017) TBDY 2018 yönetmeliğinin getirmiş olduğu deprem hesabı ve tasarımsal yenilikleri anlamakta bizlere yol gösterici olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada; TDY 2007 yönetmeliğı ile TBDY 2018 yönetmeliğinin deprem hesabı açısından farklı taşıyıcı sistemlere sahip modeller üzerinde analizler yapıp sayısal olarak karşılaştırılmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Modellere İlişkin Genel Bilgiler (General Information on Models)

TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerinin deprem hesabı açısından ortaya çıkacak sayısal farklılıkların incelenmesi için seçilen modeller her iki yönetmeliğe göre analiz edilmiştir. Taşıyıcı sistem modellerinin 3 boyutlu modellemesi ve analizleri yapısal analiz programı ETABS v16 2.0 kullanılarak yapılmıştır.

Modellerin tamamı aynı geometriye sahiptir ve modeller aşağıda verilen 4 sisteme göre analiz edilmiştir.

Grup 1: 9 normal kat ve 1 çatı katından oluşan çerçevesel sistem,

Grup 2: 1 bodrum, 8 normal kat ve 1 çatı katından oluşan çerçevesel sistem,

Grup 3: 9 normal kat ve 1 çatı katından oluşan çerçevesel- perdeli sistem,

Grup 4: 1 bodrum, 8 normal kat ve 1 çatı katından oluşan çerçevesel- perdeli sistem,

Analizleri yapılacak modellerin Konya ve İstanbul illerinde olduğu kabul edilmiştir. Modellerin plan boyutları aks-aks 17.70 m x 32.00 m, X yönü aks aralıkları 4.00 m, Y yönü aks aralıkları sırayla 7.50 m, 2.50 m, 7.50 m'dir. Kat yüksekliği her katta 3.80 m toplam bina yüksekliği 38 m olup tüm modeller 10 katlı olarak modellenmiştir. Taşıyıcı sistem modeli belirlenirken kat planında düzenli bir taşıyıcı eleman yerleşimi yapılarak düzensizlik etkisi göz önüne alınmamıştır. Binaın kullanım amacı I=1 olan otel, konut, misafirhane türü yapı olarak seçilmiştir ve hareketli yük katılım katsayısı $n=0.3$ olarak alınmıştır.

Taşıyıcı sistem; deprem etkilerinin süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçevelerle karşılandığı binalar ve deprem etkilerinin süneklik düzeyi yüksek betonarme perdeler ve çerçevelerle karşılandığı binalar olmak üzere iki farklı taşıyıcı sisteme göre modellenmiştir. Modellere ait yerel zemin sınıfları TDY 2007'ye göre Z1 ve Z3, TBDY 2018'e göre ZA ve ZD olarak seçilmiştir. Seçilen iki yerel zemin sınıfına, taşıyıcı sisteme bodrum ve bodrumsuz olmasına göre toplamda 32 adet model bulunmaktadır (Çizelge 1).

Analizleri yapılan modellere ait taşıyıcı sistem eleman boyutları tüm modellerde aynıdır. Taşıyıcı sistem eleman boyutları;

Kolon boyutları: 40/80 cm ve 80/40 cm

Kiriş boyutları: 30/60 cm

Perde boyutları: 30/210 cm

Bodrum perdesi kalınlığı: 30 cm

Çizelge 1. Bina modelleri

Table 1. Building models

		MODEL ADI	TAŞIYICI SİSTEM TÜRÜ	BODRURLU/ BODRUMSUZ	YEREL ZEMİN	İL
					SINIFI	
TDY 2007	GRUP 1	MODEL 1	Çerçeve	Bodrumsuz	Z1	İstanbul
		MODEL 2	Çerçeve	Bodrumsuz	Z1	Konya
		MODEL 3	Çerçeve	Bodrumsuz	Z3	İstanbul
		MODEL 4	Çerçeve	Bodrumsuz	Z3	Konya
	GRUP 2	MODEL 5	Çerçeve	Bodrumlu	Z1	İstanbul
		MODEL 6	Çerçeve	Bodrumlu	Z1	Konya
		MODEL 7	Çerçeve	Bodrumlu	Z3	İstanbul
		MODEL 8	Çerçeve	Bodrumlu	Z3	Konya
	GRUP 3	MODEL 9	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	Z1	İstanbul
		MODEL 10	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	Z1	Konya
		MODEL 11	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	Z3	İstanbul
		MODEL 12	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	Z3	Konya
	GRUP 4	MODEL 13	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	Z1	İstanbul
		MODEL 14	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	Z1	Konya
		MODEL 15	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	Z3	İstanbul
		MODEL 16	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	Z3	Konya
TBDY 2018	GRUP 1	MODEL 1	Çerçeve	Bodrumsuz	ZA	İstanbul
		MODEL 2	Çerçeve	Bodrumsuz	ZA	Konya
		MODEL 3	Çerçeve	Bodrumsuz	ZD	İstanbul
		MODEL 4	Çerçeve	Bodrumsuz	ZD	Konya
	GRUP 2	MODEL 5	Çerçeve	Bodrumlu	ZA	İstanbul
		MODEL 6	Çerçeve	Bodrumlu	ZA	Konya
		MODEL 7	Çerçeve	Bodrumlu	ZD	İstanbul
		MODEL 8	Çerçeve	Bodrumlu	ZD	Konya
	GRUP 3	MODEL 9	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	ZA	İstanbul
		MODEL 10	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	ZA	Konya
		MODEL 11	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	ZD	İstanbul
		MODEL 12	Çerçeve-Perde	Bodrumsuz	ZD	Konya
	GRUP 4	MODEL 13	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	ZA	İstanbul
		MODEL 14	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	ZA	Konya
		MODEL 15	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	ZD	İstanbul
		MODEL 16	Çerçeve-Perde	Bodrumlu	ZD	Konya

Döşeme kalınlığı: 15 cm seçilmiştir.

Modellerde esas alınan ölü ve hareketli yükler TS- 498'e göre belirlenmiştir.

Ölü Yük:

Betonarme elemanın zati ağırlığı: $\gamma=24,5 \text{ kN/m}^3$

Kaplama Yüğü : $g=3.00 \text{ kN/m}^2$

Dış Cephe Duvarı : $g=0.230 \text{ kN/m}^2$

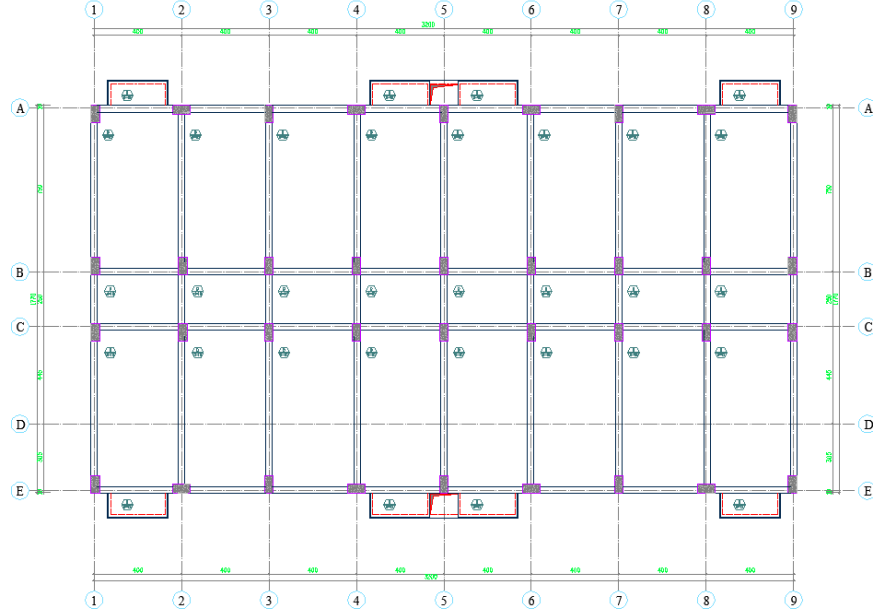
İç Bölme Duvar : $g=0.146 \text{ kN/m}^2$

Hareketli Yük:

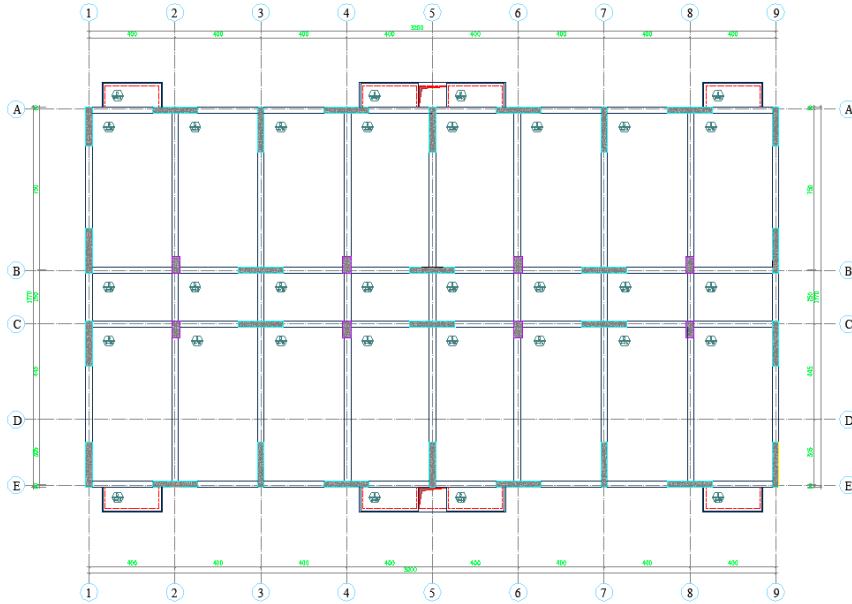
Koridor, Balkon : $q=5.00 \text{ kN/m}^2$

Oda : $q=3.50 \text{ kN/m}^2$

Çatı katı : $q=2.00 \text{ kN/m}^2$
 Yerçekimi ivmesi $g=9.81 \text{ m/s}^2$ alınmıştır.
 Seçilen modellere ait kalıp planları Şekil 1 ve Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 1. Çerçeve taşıyıcı sistemli modele ait kalıp planı
Figure 1. Formwork plan of the model with framed carrier system



Şekil 2. Çerçevesel-perdeli taşıyıcı sistemli modele ait kalıp planı
Figure 2. Formwork plan for the wall - framed carrier system model

ETABS programında oluşturulan modellerde kolon ve kirişler çubuk sonlu eleman (frame), perdeler ve TBDY 2018'de tanımlanan normal katlardan çok rijit bodrum katlarına geçişte yer alan geçiş kat döşemesi kabuk sonlu eleman (shell) olarak modellenmiştir. Perdeler ve geçiş kat döşemesi uygun boyutlardaki sonlu elemanlara (mesh) ayrılmıştır. Normal kat döşemeleri membran olarak

Çizelge 3. TDY 2007 deprem hesap parametreleri

Table 3. TDY 2007 earthquake account parameters

TDY 2007																
Taşıyıcı Sistem	Çerçevesiz-Bodursuz				Çerçevesiz-Bodrumlu				Çerçevesiz-Perdeli Bodursuz				Çerçevesiz-Perdeli Bodrumlu			
Model Adı	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6	Model 7	Model 8	Model 9	Model 10	Model 11	Model 12	Model 13	Model 14	Model 15	Model 16
T _x	1.52	1.52	1.52	1.52	1.38	1.38	1.38	1.38	1.23	1.23	1.23	1.23	1.12	1.12	1.12	1.12
T _y	1.60	1.60	1.60	1.60	1.47	1.47	1.47	1.47	1.27	1.27	1.27	1.27	1.16	1.16	1.16	1.16
Deprem Bölgesi	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
Etkin Yer İvmesi Katsayısı (A ₀)	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1	0.4	0.1
T _A /T _B	0.10/ 0.30	0.10/ 0.30	0.15/ 0.60	0.15/ 0.60	0.10/ 0.30	0.10/ 0.30	0.15/ 0.60	0.15/ 0.60	0.10/ 0.30	0.10/ 0.30	0.15/ 0.60	0.15/ 0.60	0.10/ 0.30	0.10/ 0.30	0.15/ 0.60	0.15/ 0.60

Döşemelerin kendi düzleminde rijit diyafram olduğu ve kat kütlelerinin kat kütle merkezinde toplandığı kabul edilmiştir. Kat kesme kuvvetleri %5 eksantrisite dikkate alınarak kat kütle merkezlerine etki ettirilmiştir. Deprem kuvvetleri binaya her iki doğrultuda ayrı ayrı etki ettirilmiştir.

TBDY 2018' e göre yapılan deprem hesabında kullanılan hakim doğal titreşim periyotları Çizelge 4' de verilmiştir.

Çizelge 4. TBDY 2018' e göre hesapta kullanılan periyotlar

Table 4. Periods used in the account according to TBDY 2018

TBDY 2018						
Taşıyıcı Sistem	ETABS		1.4 T _{pA}		Hesapta Kullanılan Periyot	
	T _x	T _y	T _x	T _y	T _x	T _y
Çerçevesiz-Bodursuz	2.17	2.34	2.14	2.14	2.14	2.14
Çerçevesiz-Bodrumlu	1.98	2.16	1.98	1.98	1.98	1.98
Çerçevesiz-Perdeli Bodursuz	1.84	1.93	1.50	1.50	1.50	1.50
Çerçevesiz-Perdeli Bodrumlu	1.67	1.75	1.38	1.38	1.38	1.38

TDY 2007' ye göre yapılan deprem hesabında kullanılan hakim doğal titreşim periyotları Çizelge 5' de verilmiştir.

Çizelge 5. TDY 2007' ye göre hesapta kullanılan periyotlar
Table 5. Periods used in the account according to TDY 2007

TDY 2007		
Taşıyıcı Sistem	Hesapta Kullanılan Periyot	
	T _x	T _y
Çerçeve-Bodrumsuz	1.52	1.60
Çerçeve-Bodrumlu	1.38	1.47
Çerçevesiz-Perdeli Bodrumsuz	1.23	1.27
Çerçevesiz-Perdeli Bodrumlu	1.12	1.16

Modellerin deprem hesabında kullanılan R katsayıları Çizelge 6' da verilmiştir.

Çizelge 6. Hesapta kullanılan R katsayıları
Table 6. R coefficients used in the account

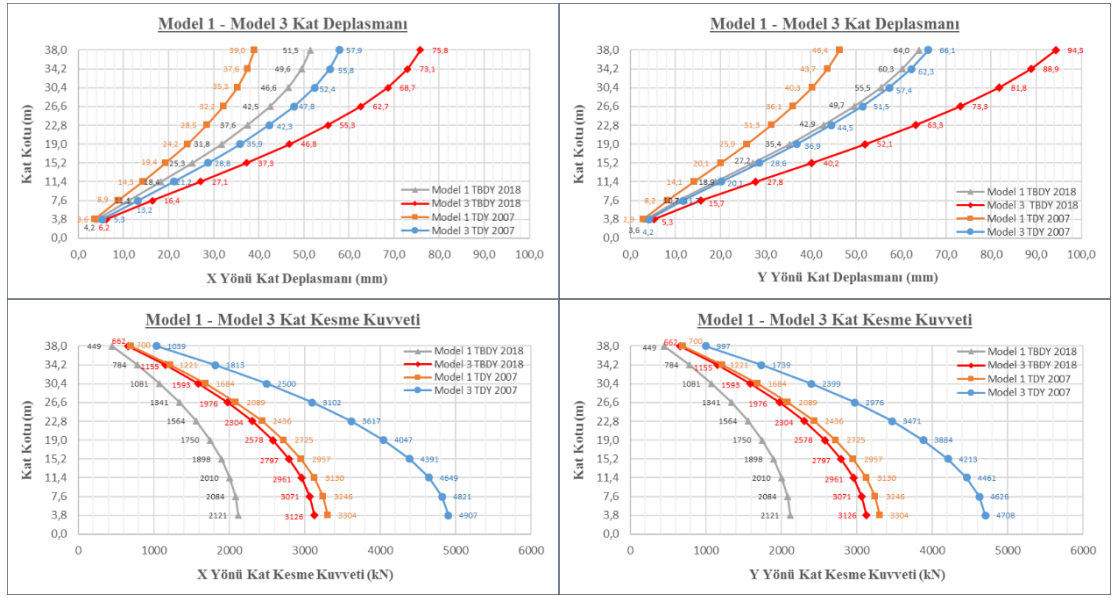
Taşıyıcı Sistem	R Katsayısı			
	TDY 2007		TBDY 2018	
	R _x	R _y	R _x	R _y
Çerçeve-Bodrumsuz	8.00	8.00	8.00	8.00
Çerçeve-Bodrumlu	8.00	8.00	8.00	8.00
Çerçevesiz-Perdeli Bodrumsuz	6.48	6.68	7.00	7.00
Çerçevesiz-Perdeli Bodrumlu	6.60	6.68	7.00	7.00

Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Analysis Results)

Tüm modeller için TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre yapılan analizler sonucunda X ve Y deprem doğrultusunda meydana gelen kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri Şekil 3-Şekil 10' da verilmiştir. Verilen bu grafiklerden kat deplasmanı miktarında ve kat kesme kuvvetinde meydana gelen fark TDY 2007 ve TBDY 2018 için de karşılaştırmalı olarak görülmektedir.

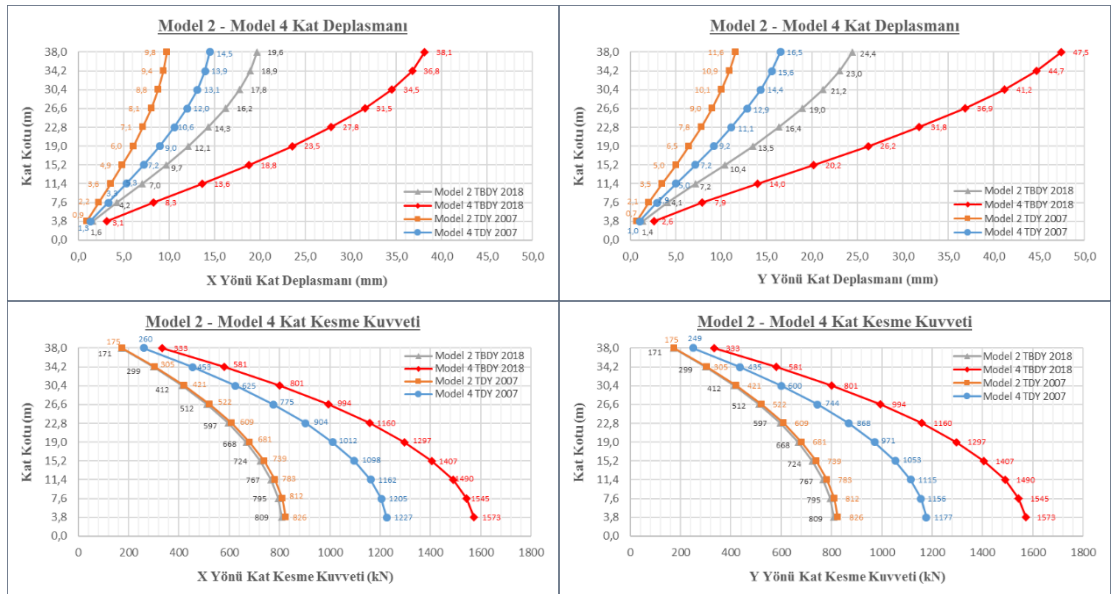
Çerçevesiz – bodrumsuz modellerin karşılaştırılması (Comparison of framed-without basement models)

Çerçevesiz bodrumsuz model 1-3 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 3' de, çerçevesiz bodrumsuz model 2-4 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 3. Model 1-Model 3 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 3. Model 1-Model 3 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

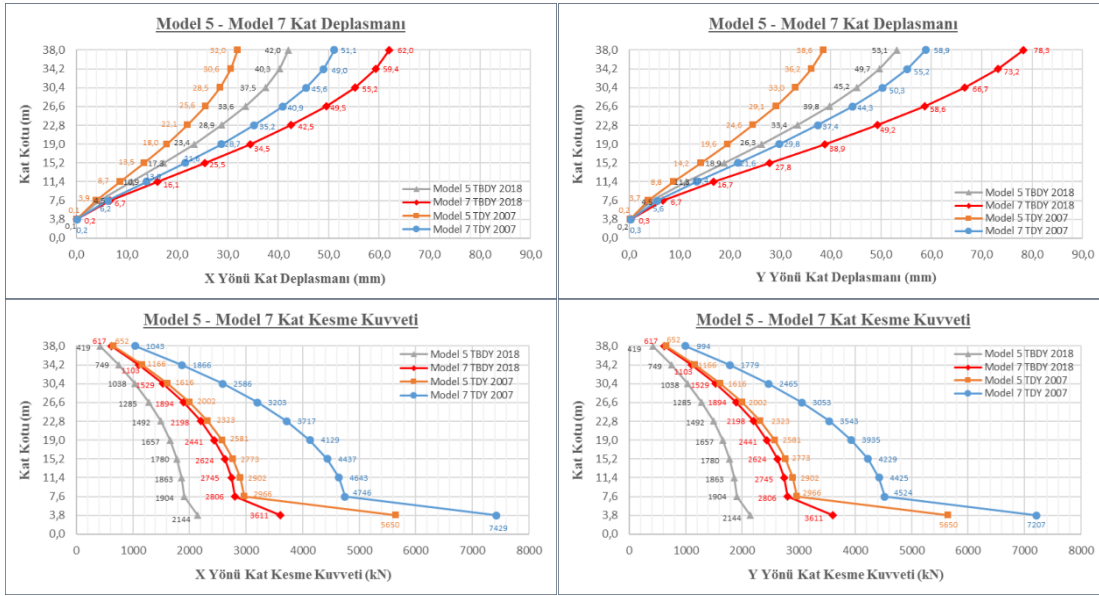


Şekil 4. Model 2-Model 4 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 4. Model 2-Model 4 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

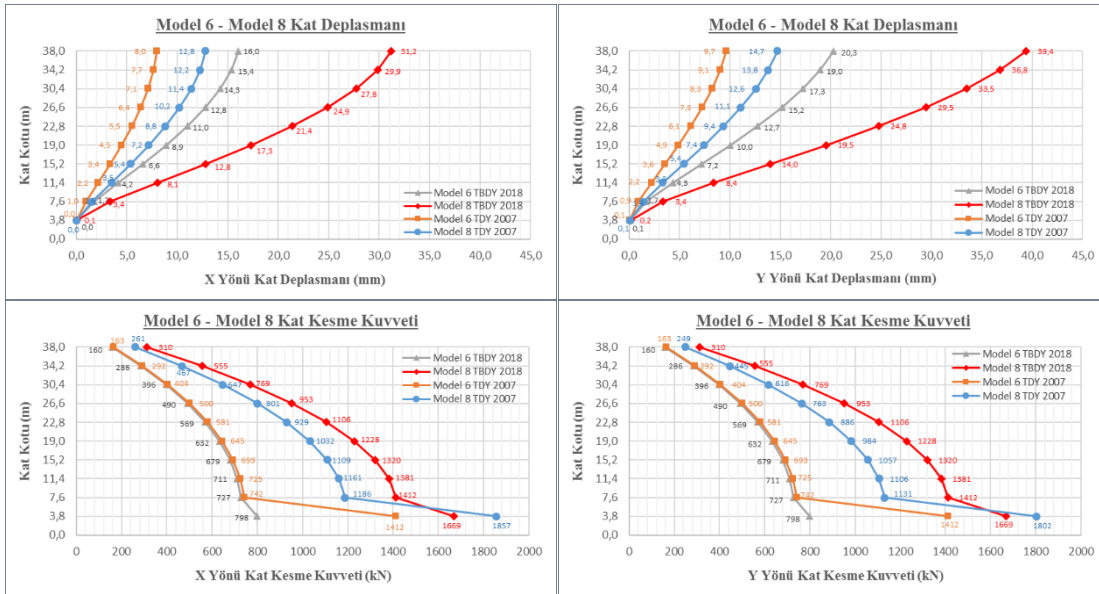
Çerçevesel – bodrumlu modellerin karşılaştırılması (Comparison of framed- with basement models)

Çerçevesel bodrumlu model 5-7 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 5' de, çerçevesel bodrumlu model 6-8 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 6' da verilmiştir.



Şekil 5. Model 5-Model 7 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 5. Model 5-Model 7 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

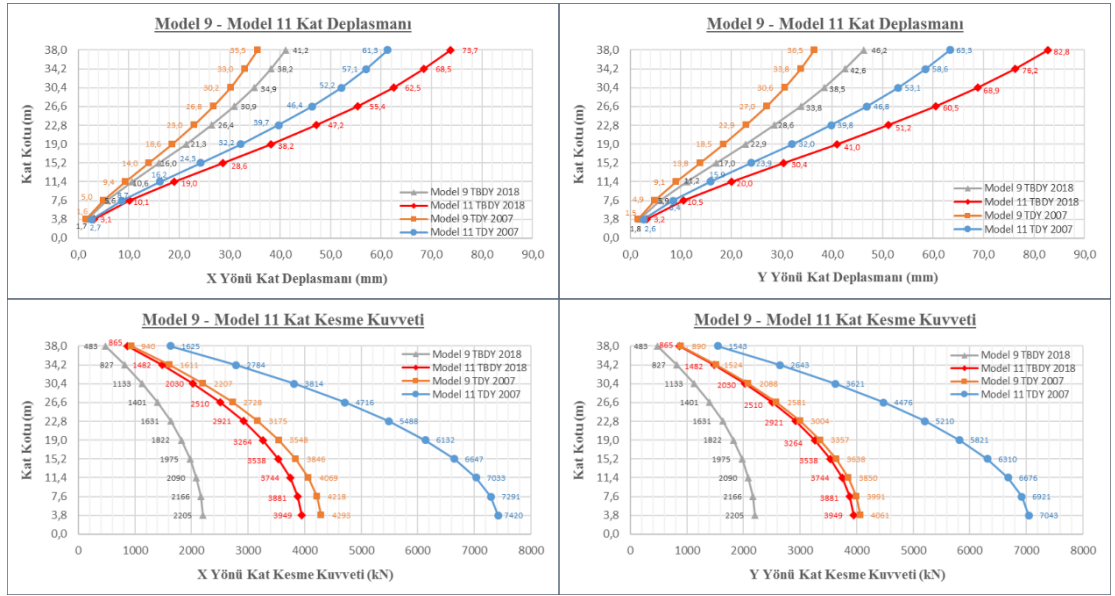


Şekil 6. Model 6-Model 8 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 6. Model 6-Model 8 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

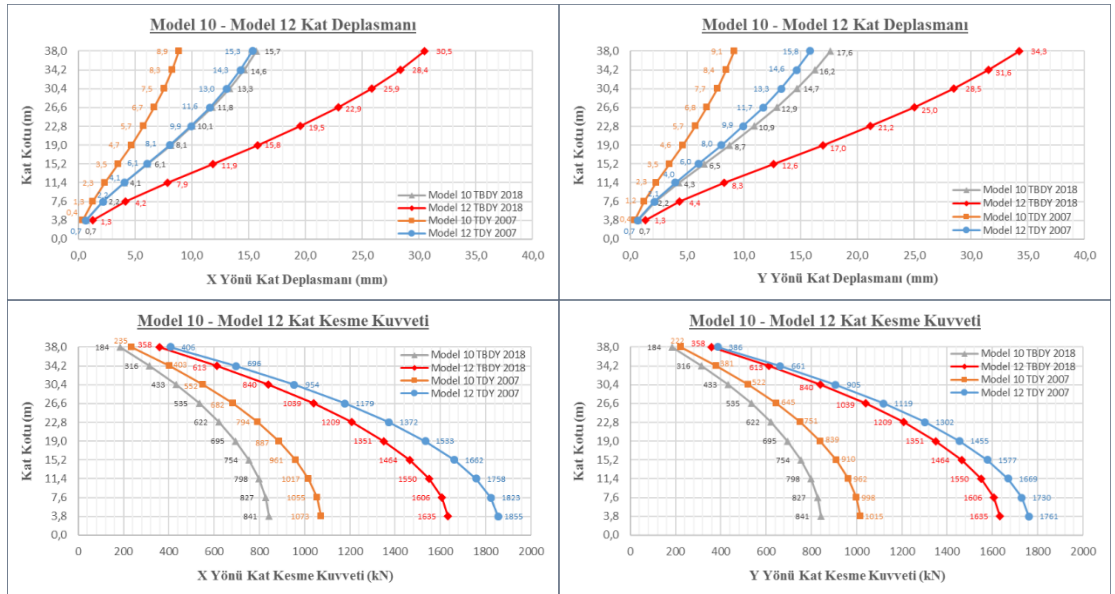
Çerçevesiz – perdeli bodursuz modellerin karşılaştırılması (Comparison of wall-framed without basement models)

Çerçevesiz perdeli model 9-11 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 7'de, çerçevesiz perdeli model 10-12 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Model 9-Model 11 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 7. Model 9-Model 11 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

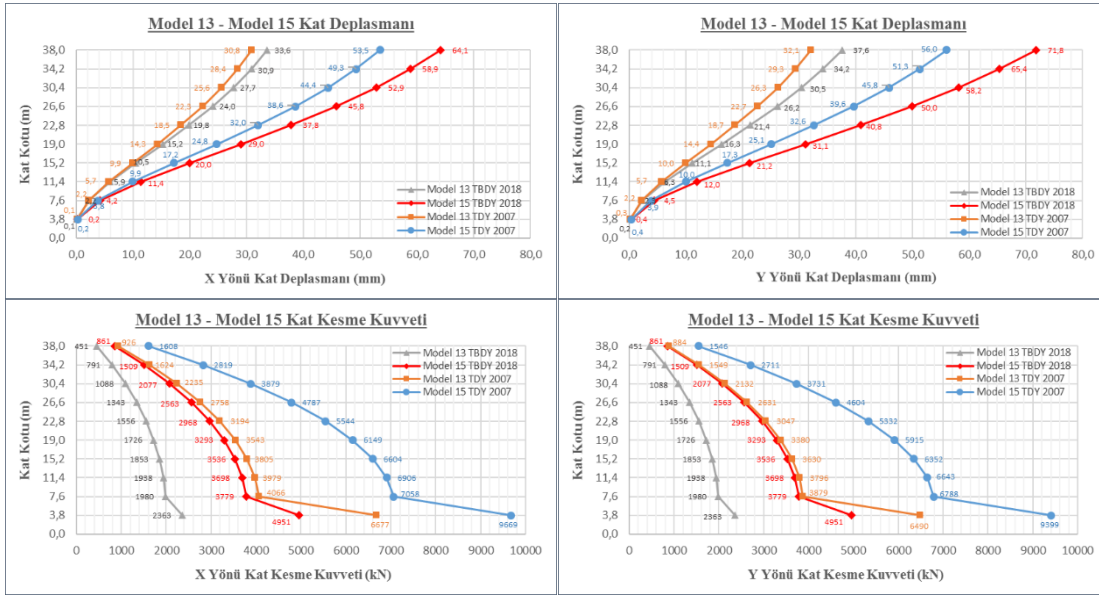


Şekil 8. Model 10-Model 12 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 8. Model 10-Model 12 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

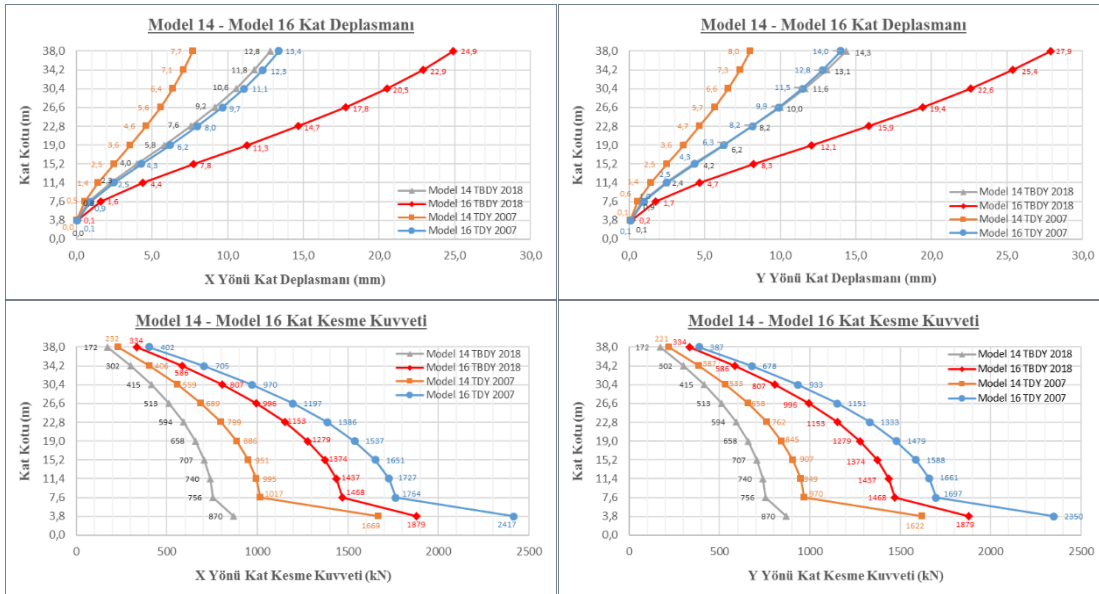
Çerçevesi – perdeli bodrum'lu modellerin karşılaştırılması (Comparison of wall-framed with basement models)

Çerçevesi perdeli model 13-15 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 9' da, çerçevesi perdeli model 14-16 için kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri dağılımı Şekil 10' da verilmiştir.



Şekil 9. Model 13-Model 15 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 9. Model 13-Model 15 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018



Şekil 10. Model 14-Model 16 X ve Y yönü kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetlerinin TDY 2007 ve TBDY 2018' e göre karşılaştırması

Figure 10. Model 14-Model 16 X and Y direction floor displacements and floor shearing forces according to TDY 2007 and TBDY 2018

SONUÇLAR ve ÖNERİLER (CONCLUSIONS and SUGGESTIONS)

Yapılan analizlerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

✓ TBDY 2018' e göre yapılan analizlerde etkin kesit rijitlik katsayılarının kullanılmasının yapı periyodunu TDY 2007' ye göre arttırdığı görülmüştür. Yapı periyodundaki bu artışa bağlı olarak TBDY 2018' e göre yapılan analizlerde kat kesme kuvvetlerinde azalma olmuştur. Yapı periyodundaki bu artış çerçevesi-bodrumsuz modellerde %43~%46, çerçevesi- bodrumlu modellerde %43~%47, çerçevesi-perdeli bodrumsuz modellerde %50~%52 ve çerçevesi-perdeli bodrumlu modellerde ise %49~%51 mertebelerindedir.

✓ TBDY 2018' e göre yapılan analizlerde meydana gelen kat deplasmanının TDY 2007' ye göre artış gösterdiği görülmüştür. Buna göre kat deplasmanları;

- Çerçevesiz-bodumsuz modellerden İstanbul' da yer alanlarda %31 ~ %42, Konya' da yer alanlarda ise %100~%188,
- Çerçevesiz-bodrumlu modellerden İstanbul' da yer alanlarda %31 ~ %38, Konya' da yer alanlarda ise %100~%168,
- Çerçevesiz-perdeli bodumsuz modellerden İstanbul' da yer alanlarda %16~%31, Konya' da yer alanlarda ise %76~%117,
- Çerçevesiz-perdeli bodrumlu modellerden İstanbul' da yer alanlarda %9~%28, Konya' da yer alanlarda ise %66~%99 oranında artış göstermiştir.

Modellere ait kat deplasmanı oranlarına baktığımızda en fazla oranda deplasman artışının çerçevesiz-bodumsuz modellerde olduğu görülmektedir.

✓ TBDY 2018' e göre elde edilen kat kesme kuvvetlerinde TDY 2007' ye göre elde edilen kat kesme kuvvetlerine göre genellikle azalma görülmüştür. Kat kesme kuvvetlerinde;

- İstanbul' da bulunan çerçevesiz-bodumsuz modellerde %33~%36 civarında bir azalma meydana gelirken Konya 'daki çerçevesiz-bodumsuz modellerden Z1-ZA zemin sınıfındaki modelde %2 azalma meydana gelirken Z3-ZD zemin sınıfındaki modelde %28~%34 oranında bir artış olmuştur.
- Çerçevesiz-bodrumlu olan İstanbul' daki modellerde kat kesme kuvvetinde %50~%62 oranında, Konya' daki modellerde ise %7~%43 oranında bir azalma olmuştur.
- Çerçevesiz-perdeli bodumsuz olan İstanbul' daki modellerde kat kesme kuvvetinde %44~%49 oranında, Konya' daki modellerde ise %7~%22 oranında azalma olmuştur.
- Çerçevesiz-perdeli bodrumlu olan İstanbul' daki modellerde kat kesme kuvvetinde %47~%65 oranında, Konya' daki modellerde ise %20~%48 oranında azalma olmuştur.

✓ Her iki yönetmeliğe göre analizleri yapılan modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde modellerde meydana gelen kat deplasmanları ve kat kesme kuvvetleri TDY 2007' de de TBDY 2018' de de artış göstermiştir.

• İstanbul' da bulunan çerçevesiz-bodumsuz modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %42~%48, kat kesme kuvvetinde %42~%48, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %47, kat kesme kuvvetinde ise %47 oranında bir artış olmuştur.

• Konya' da bulunan çerçevesiz-bodumsuz modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %42~%48, kat kesme kuvvetinde %43~%49, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %95, kat kesme kuvvetinde ise %95 oranında bir artış olmuştur.

• İstanbul' da bulunan çerçevesiz-bodrumlu modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %53~%60, kat kesme kuvvetinde %27~%31, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %48, kat kesme kuvvetinde ise %68 oranında bir artış olmuştur.

• Konya' da bulunan çerçevesiz-bodrumlu modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %51~%60, kat kesme kuvvetinde %28~%32, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %95, kat kesme kuvvetinde ise %109 oranında bir artış olmuştur.

• İstanbul' da bulunan çerçevesiz-perdeli bodumsuz modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %73, kat kesme kuvvetinde %73, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %79, kat kesme kuvvetinde ise %79 oranında bir artış olmuştur.

• Konya' da bulunan çerçevesiz-perdeli bodumsuz modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007' ye göre Z1' den Z3' e değiştiğinde kat deplasmanında %72~%74, kat kesme kuvvetinde %73, TBDY 2018' e göre ZA' dan ZD' ye değiştiğinde kat deplasmanında %95, kat kesme kuvvetinde ise %94 oranında bir artış olmuştur.

- İstanbul’da bulunan çerçeveli-perdeli bodrumlu modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007’ ye göre Z1’ den Z3’ e değiştiğinde kat deplasmanında %74, kat kesme kuvvetinde %45, TBDY 2018’e göre ZA’ dan ZD’ ye değiştiğinde kat deplasmanında %91, kat kesme kuvvetinde ise %109 oranında bir artış olmuştur.

- Konya’ da bulunan çerçeveli-perdeli bodrumsuz modellerde konum aynı kalırken zemin sınıfı TDY 2007’ ye göre Z1’den Z3’ e değiştiğinde kat deplasmanında %75, kat kesme kuvvetinde %45, TBDY 2018’ e göre ZA’ dan ZD’ ye değiştiğinde kat deplasmanında %95, kat kesme kuvvetinde ise %116 oranında bir artış olmuştur.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar neticesinde; TBDY 2018’ de etkin kesit rijitlik katsayılarının kullanılması doğal titreşim periyotlarında ve kat deplasman miktarlarında artışa neden olmuştur. Bu artışa bağlı olarak yeni yönetmeliğe göre yapılan analizlerde kat kesme kuvvetlerinde genellikle azalma olduğu görülmüştür.

TBDY 2018 ile birlikte zemin etkisi hesaplarda daha gerçekçi olarak etki etmektedir. Yerel zemin sınıfının sağlam zeminden daha kötü bir zemine doğru değişmesiyle kat deplasmanlarında ve kat kesme kuvvetlerinde görülen artış miktarının TDY 2007’ ye kıyasla TBDY 2018’ de daha fazla olduğu görülmüştür.

Yeni yönetmeliğin deprem tehlikesini daha gerçekçi olarak ortaya koyduğu düşünülmektedir. TBDY 2018’ in uygulanması ile taşıyıcı sistem eleman boyutlarında artış beklenmektedir. Bina yükseklikleri farklı veya düzensizliklerin olduğu taşıyıcı sistem modelleri kullanılarak ya da ŞGDT yaklaşımına uygun modeller seçilerek yapılması önerilen benzer çalışmaların bu çalışmada elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve geliştirilmesi açısından yararı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların İstanbul (Enlem 41.018071, Boylam 29.15173) ve Konya (Enlem 37.869972, Boylam 32.494208) için geçerli olduğu ve TDY 2007’ ye göre birinci ve dördüncü derece deprem bölgesinde bulunan farklı koordinatlar için TBDY 2018 Deprem Tehlike Haritalarından farklı spektrum değerlerine ulaşılacağı için bu çalışmadaki sonuçları etkileyebileceği bilinmelidir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- AFAD, Türkiye Deprem Tehlike Haritası, <https://tdth.afad.gov.tr> ,ziyaret tarihi: 29.01.2021
- DBYBHY, 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Demir, A., Kayhan A. H., “Deprem Yönetmeliği 2007 ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile Uyumlu Zaman Tanım Alanında Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması”, *4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 11-13 Ekim 2017.
- Erdem, M. M., Bikçe M., 2017, “Maksimum Azaltılmış Görelî Kat Ötelemelerinin Güncel (DBYBHY2007) ve Yeni Yönetmelik Taslağına (TBDY2016) Göre Mukayesesi”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 32, No 2, 253-262.
- Keskin, E., Bozdoğan K.B., 2018, “2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerinin Kırklareli İli Özelinde Değerlendirilmesi”, *Kırklareli University Journal Of Engineering And Science*, Cilt 4 No 1, 74-90.
- Öztürk, M., 2018, “2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası İle ilgili İç Anadolu Bölgesi Bazında Bir Değerlendirme”, *Selçuk Teknik Dergisi*, Cilt 17, No 2, 31-42.
- Öztürk, H., Demir A., Dok G., Güç H., “Betonarme Kolonların Etkin Kesit Rijitlikleri Üzerine Yönetmeliklerin Yaklaşımları”, *4.Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 11-13 Ekim 2017.
- Sümeli, O. H., 2017, *Mevcut Betonarme Bir Bina Üzerinde 2007 ve 2017 Deprem Yönetmeliklerinin Karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.
- Tunç, G., Tanfener T., “2007 ve 2016 Bina Deprem Yönetmeliklerinin Örneklerle Mukayesesi”, *3.Ulusal Yapı Konferansı ve Sergisi Teknik Tasarım, Güvenlik ve Erişilebilirlik*, TMMOB Mimarlar Odası, Ankara, 24-26 Kasım 2016.

Zorlu, M., Akbaş B., 2017, "Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne Göre Çelik Yapı Tasarımı", *Uluslararası Katılımlı 7.Çelik Yapı Sempozyumu*, Gaziantep, 292-305, 2017.



DERİN SİNİR AĞLARI VE YENİDEN ÖRNEKLEME METOTLARI İLE RUTİN KAN TESTLERİNE DAYALI COVID-19 TESPİTİ

¹Mahmut TOKMAK , ²Ecir Uğur KÜÇÜKSİLLE 

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Gelendost Meslek Yüksekokulu, Finans-Bankacılık Ve Sigortacılık Bölümü, Isparta, TÜRKİYE

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, TÜRKİYE

¹mahmuttokmak@isparta.edu.tr, ²ecirkucuksille@sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 02.03.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.06.2020)

ÖZ: İlk olarak Aralık 2019'da ortaya çıkan ve dünya çapında bir salgına neden olan Koronavirüs (COVID-19) hastalığı; akut solunum sendromu SARS-CoV-2'nin neden olduğu viral bir hastalık olarak tanımlanmaktadır. COVID-19 hastalığının tespiti için güncel olan rRT-PCR testi kullanılmaktadır. Bu testin uzun geri dönüş süresi, %15-20 civarında yanlış negatif oranları ve pahalı ekipmanları olması nedeniyle rutin kan incelemelerinin değerleri ile tespit yöntemi daha hızlı ve daha ucuz bir alternatif olarak değerlendirilebilmektedir. Bu çalışmada, rutin kan testlerinden Derin Sinir Ağları (DSA) kullanılarak COVID-19 tespit edilmeye çalışılmıştır. Kullanılan veri setinde sınıf dengesizliği olduğu için yeniden örnekleme yöntemleriyle sınıf dengesizliği giderilmiş ve kullanılan algoritmaların performansları değerlendirilmiştir. Yeniden örnekleme yapılırken SMOTE, ADASYN, Geometric SMOTE, Random UnderSampler, Random OverSampler algoritmaları kullanılmıştır. Kurulan model sonunda 0,985 doğruluk değeri ve 0,99 F1-skoru ile en başarılı sonuç, Random OverSampler algoritması ile alınmıştır. Ayrıca yeni girilecek veriler için tahmin yapabilmek amacıyla, PyQt kullanılarak bir uygulama geliştirilmiştir ve kullanılan niteliklerin modele katkıları SHapley Additive Explanations (SHAP) tekniği ile belirlenmiş ve açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin Sinir Ağları, Yeniden Örnekleme, COVID-19

Covid-19 Detection Based on Routine Blood Tests with Deep Neural Networks and Resampling Methods

ABSTRACT: Coronavirus (COVID-19) disease, which first appeared in December 2019 and caused a worldwide outbreak; is described as a viral disease caused by acute respiratory syndrome SARS-CoV-2. The current RRT-PCR test is used to detect COVID-19 disease. Due to long return time of this test, about 15-20% false-negative rates and expensive equipment, the detection method with the values of routine blood analyses can be considered as a faster and cheaper alternative. In this study, COVID-19 was tried to be detected by using Deep Neural Networks (DNN), one of the routine blood tests. Because there is class imbalance in the used data set, class imbalance has been eliminated by resampling methods and the performance of used algorithms has been evaluated. While resampling, SMOTE, ADASYN, Geometric SMOTE, Random UnderSampler, Random OverSampler algorithms were used. As a result of established model, the most successful result was obtained with the Random OverSampler algorithm, with an accuracy of 0.985 and an F1-score of 0.99. In addition, an application has been developed using PyQt to

make predictions for new data to be entered and the contributions of used attributes to the model were determined and explained with the SHapley Additive Explanations (SHAP) technique.

Key Words: Deep Neural Networks, Resampling, COVID-19

GİRİŞ (INTRODUCTION)

COVID-19 hastalığına neden olan SARS-CoV-2, coronaviridae ailesine ait bulaşıcı bir virüstür. Hastalık, öksürük, ateş, yorgunluk ve nefes darlığı gibi semptomlara neden olmaktadır (Cascella ve diğ., 2020; Mohammad ve Tayarani, 2020; "T.C. Sağlık Bakanlığı", 2020). SARS-CoV-2'nin ilk olarak Aralık 2019'da Çin'in Wuhan kentinde görüldüğü bildirilmiştir. O günden günümüze kadar geçen sürede sürekli olarak tüm dünyaya yayılmıştır. Virüsün yayılımı, insan hayatının her alanında büyük zorluklara neden olmuş, başta insan hayatının sona ermesi olmak üzere; ekonomi, eğitim, sanat, kültür gibi birçok alanda yeni sorunlar ortaya çıkmıştır. Hastalığın tanısı, tedavisi ve ortaya çıkan bu sorunları çözmek için her gün yeni teknikler geliştirilmektedir (Mohammad ve Tayarani, 2020; Shilbayeh ve diğ., 2020).

SARS-CoV-2 enfeksiyonlarını tespit etmek için kullanılan standart test; ters polimeraz zincir reaksiyonu (PCR) veya ters transkriptaz-PCR (RT-PCR) tekniği kullanılarak gerçekleştirilen moleküler testtir. Bununla birlikte, testin yürütülmesi zaman alıcıdır, özel ekipman ve reaktiflerin kullanılmasını, örneklerin toplanması için uzman ve eğitimli personelin katılımını gerektirmektedir (Banerjee ve diğ., 2020; Vogels ve diğ., 2020). Ek olarak, kullanılan standart testin akciğer bilgisayarlı tomografisine (BT) kıyasla %80 doğruluğu ortaya konmuştur (AlJame ve diğ., 2020; Banerjee ve diğ., 2020). Hastaları tespit etmenin bir yolu, profesyonel ekipman gerektiren BT veya X-Ray görüntüleridir. Bu görüntüler değerlendirilerek COVID-19 tespit edilebilmektedir (Jacobi ve diğ., 2020; Maghdid ve diğ., 2020; Mohammad ve Tayarani, 2020).

Hastalık teşhisine, tahminine, önlenmesine, tedavisine, yönetimine ve antiviral ilaç keşfine katkıda bulunarak COVID-19 salgınının yayılmasını kontrol altına almak ve mevcut klinik prosedürlere yardımcı olmak amacıyla makine öğrenimi (ML) ve yapay zeka (AI) yaklaşımları büyük ilgi toplamakta ve hızla çalışmalar geliştirilmektedir (AlJame ve diğ., 2020; Banerjee ve diğ., 2020; Cabitza ve diğ., 2021). Bu yaklaşımların; X-Ray, BT görüntülerinin analizi ile tespit yöntemleri ve laboratuvar ortamında yapılan kan örneklerinden elde edilen sonuçların analizi ile tespit çalışmaları olmak üzere üç farklı yöntem üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir.

Makine öğrenme yöntemleri ile X-Ray ve BT görüntüleri ile COVID-19 tespit mekanizmaları, X-Ray ve BT cihazları ile çekilen akciğer grafisi verilerinin modellenmesi esasına dayanmaktadır. Burada elde edilen veriler ile yapılan analizlerde başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Bununla birlikte görüntü almaya yarayan cihazlardaki radyasyon yayma oranları, cihaz sayısındaki yetersizlik ve yüksek maliyetler bu yöntemle tespit mekanizmalarının dezavantajlı yönü olarak belirtilmektedir (AlJame ve diğ., 2020). X-ray ve BT görüntüleri ile tespit mekanizmalarının çoğunlukla Derin Öğrenme (Deep Learning: DL) yöntemlerini kullandıkları görülmektedir. DL yöntemlerinden Tekrarlayan Sinir Ağları (RNN) ve Evrimsel Sinir Ağları (CNN) sıklıkla çalışılmıştır. RNN yönteminde LSTM mimarisi, CNN yönteminde ise GoogleNet, AlexNet, VGG16, InceptionResNetV2, ResNet34, ResNet50, DenseNet121, DenseNet169, DenseNet201, VGG19, MobilenetV2, NasNetMobile, ve ResNet15V2 mimarilerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda kullanılan modellerin performans değerlendirme kriterlerine bakıldığında ise; kullanılan modellerle elde edilen doğruluk (Accuracy) değerleri %73-%100 arasında değişmekte, F1-skoru (F1-score) %69,13-%100 arasında değişmektedir (Ahsan ve diğ., 2020; Bogu ve Snyder, 2021; Civit-Masot ve diğ., 2020; Hammoudi ve diğ., 2020; Kamal ve diğ., 2021; Loey ve diğ., 2020; Maghdid ve diğ., 2020; Rajaraman ve diğ., 2020; Singh ve diğ., 2020; Shoeibi ve diğ., 2020; Zheng ve diğ., 2020). Bu çalışmaların yanı sıra, COVID-19 için kullanılan DL yöntemlerini ve yapay zeka yöntemlerini araştırıp inceleyen derleme çalışmaları mevcuttur (Shorten ve diğ., 2020; Syeda ve diğ., 2021).

Son zamanlarda yapılan klinik çalışmalar, COVID-19 hastalarında kan parametrelerinin önemli değişiklikler gösterdiğini ve bu parametrelerin COVID-19 tanımlanmasını için ilk taramada, rol oynayabileceğini ortaya koymuştur (AlJame ve diğ., 2020; Fan ve diğ., 2020; Formica ve diğ., 2020; Gao ve

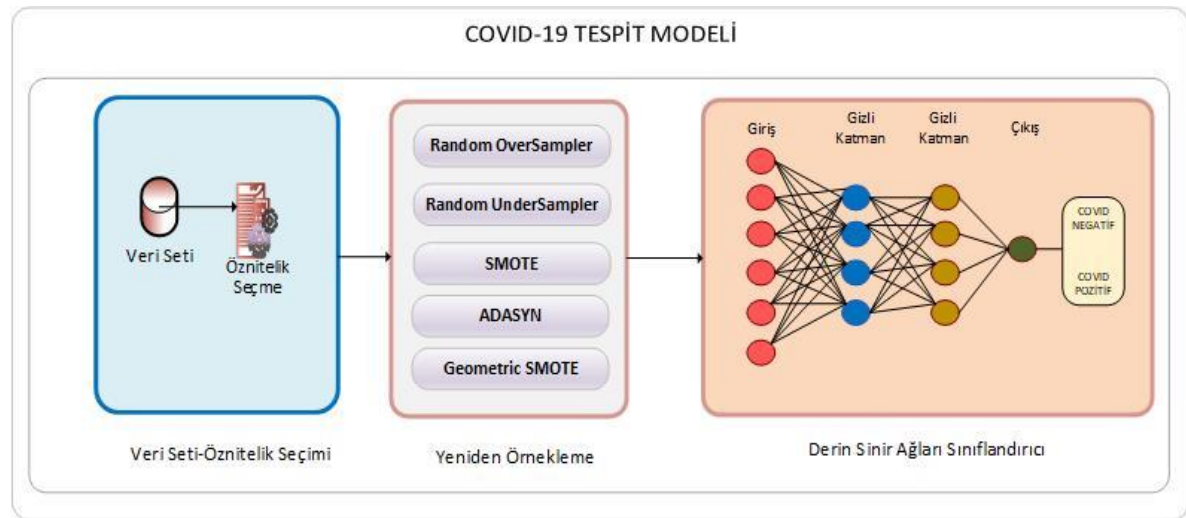
diğ., 2020). Bu bağlamda COVID-19 tespit çalışmalarının yoğunlaştığı üçüncü yöntem olan laboratuvar ortamında elde edilen kan örnekleri ile ilgili yapılan çalışmalar ise; tam kan sayımı ile ilgili verilerin makine öğrenme yöntemleri ile modellenip tespit edilmesi esasına dayanmaktadır.

Bu çalışmalarla ilgili literatür taraması yapıldığında, çoğu araştırmacının, Brezilya'nın Sao Paulo kentindeki Israelita Albert Einstein Hastanesi'nden toplanan laboratuvar test sonuçları veri setini kullandığı görülmüştür (AlJame ve diğ., 2020; "Kaggle, Einstein Data4u", 2020). Bu veri setinde bulunan tam kan sayımı değerleri Navie Bayes (NB), Bayes Ağları (Bayesian Networks: BN), Yapay Sinir Ağları (NN:Neural Network), Rastgele Orman (RF: Random Forest), Ekstra Ağaçlar (Extra Trees: ET), Lojistik Regresyon (Logistic Regression: LR), Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines: SVM), Gradient Boosted Ağaçları (Gradient Boosted Trees: GBT), XGBoost, Gradient Boosting (GB), Kollektif Öğrenme (Ensemble Learning: EL), GLMNET (Lassoelastic-Net Regularized Generalized Linear), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron: MLP) gibi ML algoritmaları ile eğitilerek sonuçlar alınmıştır (AlJame ve diğ., 2020; Avila ve diğ., 2020; Banerjee ve diğ., 2020; Czako ve diğ., 2020; de Moraes Batista ve diğ., 2020; Dlotko ve Rudkin, 2020; Mohammad ve Tayarani, 2020; Schwab ve diğ., 2020; Soares, 2020; Yavaş ve diğ., 2020).

Bu çalışmada, literatürde incelediğimiz diğer çalışmalarda yöntem olarak çalışılmamış, DSA yöntemi kullanılarak rutin kan testlerinden COVID-19 tespit edilmeye çalışılmıştır. Aynı zamanda kullanılan veri setindeki sınıf dağılımı dengesizliğini gidermek için literatürdeki çalışmalar, SMOTE algoritması üzerinde odaklanılmışlardır (AlJame ve diğ., 2020; Czako ve diğ., 2020; de Freitas Barbosa ve diğ., 2021; Soares, 2020; Yavaş ve diğ., 2020). Bu çalışmada ise yeniden örnekleme algoritmalarının performanslarını ortaya koymak amacıyla SMOTE, ADASYN, Geometric SMOTE, Random UnderSampler, Random OverSampler algoritmaları kullanılmış ve algoritmaların DSA modeli ile performans ölçütleri ortaya konmuştur

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Bu bölümde, sınıflandırma için kullanılan modelin ayrıntılı açıklamasını yapılmıştır. İlk olarak, kullanılan veri kümesini ve seçilen özellikleri açıklanmıştır. Veri hazırlama süreci içinde, veri kümesi yeniden örnekleme metotları SMOTE, ADASYN, Geometric SMOTE, Random UnderSampler, Random OverSampler ile dengesiz sınıf özellikleri dengeli hale getirilme işlemi açıklanmıştır. Son olarak, DSA ile sınıflandırma ayrıntıları açıklanmıştır. Çalışmada kullanılan model Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. COVID-19 tespit modeli

Figure 1. COVID-19 detection model

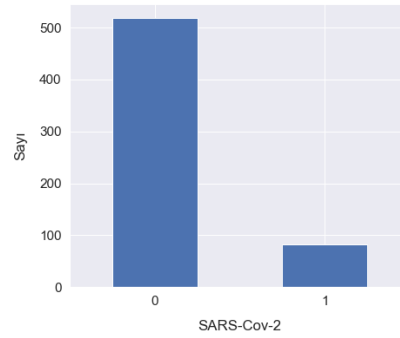
Veri Seti ve Öznitelik Seçimi (Dataset and Feature Selection)

Çalışmada Kaggle platformu tarafından paylaşılan Einstein Data4u anonim veri seti kullanılmıştır ("Kaggle, Einstein Data4u", 2020). Kaggle tarafından paylaşılan veri seti; Brezilya'nın São Paulo kentinde bulunan Albert Einstein Hastanesine başvuran 5644 hastadan elde edilmiştir. Veri seti 28 Mart 2020-3 Nisan 2020 tarihleri arasında toplanan verilerden oluşmakta olup; kan testleri, idrar testleri, SARS-CoV-2 testi, rt-PCR testi, influenza A virüslerinin varlığı dahil olmak üzere 111 laboratuvar test sonucu niteliğine sahiptir. Klinik veriler, ortalama sifıra ve birim standart sapmaya sahip olacak şekilde paylaşan platform tarafından normalize edilmiştir. Veri setinde hastaneye başvuran 5644 kişiden 558'i SARS-Cov2 pozitif, 5086 tanesi ise SARS-Cov2 negatif olarak tespit edilmiştir.

Bu veri setinden özniteliklerin seçimi; kan sayımı ilgili mevcut klinik çalışmalar (Fan ve diğ., 2020; Formica ve diğ., 2020; Gao ve diğ., 2020) ve literatürde bu veri seti ile yapılmış çalışmalar dikkate alınarak yapılmıştır (AlJame ve diğ., 2020; Avila ve diğ., 2020; Banerjee ve diğ., 2020; Czako ve diğ., 2020; de Moraes Batista ve diğ., 2020; Dlotko ve Rudkin, 2020; Schwab ve diğ., 2020; Yavaş ve diğ., 2020). Aynı zamanda, 111 nitelikten %90'ın üzerinde eksik veri içeren nitelikler elimine edildiğinde 39 nitelik kalmaktadır. Kalan nitelikler içinde bir tanesi hastaya ait id numarası, üç tanesi ise hastanın alındığı servis ile ilgilidir. Seçilen öznitelikler Çizelge 1 de gösterilmiştir.

Tüm veri setinden Çizelge 1'deki öznitelikler seçildikten sonra satırlar düzeyinde %70'in üstünde doluluk ihtiva eden 602 veri seçilmiştir. Eksik olan veriler ortalama yerine koyma metodu ile tamamlanmıştır.

Şekil 2'de gösterildiği gibi SARS-Cov-2 niteliği 519 (%86,3) negatif, 83 (%13,7) pozitif değer içermektedir. Veri seti içinde "positive" ve "negative" şeklinde yer alan değerler; "negative" için 0, "positive" için 1 olacak şekilde etiketlenmiştir. "Negative" nitelik sayısının "positive" nitelik sayısından çok fazla olmasından dolayı hedef nitelikte dengesiz bir dağılım görülmektedir. Bu dengesizliğin giderilmesi için yeniden örnekleme (Resampling) yöntemleri kullanılmıştır.



Şekil 2. SARS-Cov-2 pozitif ve negatif sayıları

Figure 2. SARS-Cov-2 positive and negative counts

Çizelge 1. Veri seti öznitelikleri ve istatistikleri

Table 1. Dataset feature and statistics

Öznitelikler	Veri Sayısı	Ortalama	Standart Sapma	En Küçük Değer	En Büyük Değer	Eksik Veri Oranı %
Creatinine	423	0,004102216	0,998792901	-2,389998674	5,053571701	29,73
Proteina C reativa mg/dL	502	0,003367328	1,004205154	-0,535362244	8,02667141	16,61
SARS-Cov-2 exam result	602	0,137873754	0,345054141	0	1	0
Hematocrit	602	-0,001267365	1,001178115	-4,501419544	2,662703753	0
Hemoglobin	602	-0,000899624	1,001418474	-4,345602989	2,671867847	0
Platelets	602	-3,535003563	1,000831594	-2,5524261	9,53203392	0
Mean platelet volume	599	7,43814225	1,000835769	-2,457574606	3,713052034	0,5
Red blood Cells	602	8,424446978	1,000831604	-3,970608234	3,645706177	0
Lymphocytes	602	-7,866736362	1,000831601	-1,865069628	3,764099598	0
Mean corpuscular hemoglobin concentration (MCHC)	602	1,014863142	1,000831599	-5,431808472	3,331070662	0
Leukocytes	602	6,215832763	1,000831604	-2,020302534	4,522041798	0
Basophils	602	-6,633739537	1,000831604	-1,140143752	11,07821941	0
Mean corpuscular hemoglobin (MCH)	602	-3,453009945	1,000831602	-5,937603951	4,098546028	0
Eosinophils	602	7,206147097	1,0008316	-0,835507691	8,350875854	0
Mean corpuscular volume (MCV)	602	-4,155369497	1,000831604	-5,101581097	3,410979986	0
Monocytes	601	-3,220113667	1,000832984	-2,163721323	4,533397198	0,17
Neutrophils	513	5,908361247	1,000976086	-3,339774609	2,535929203	14,78
Urea	396	0,000921818	1,002359765	-1,630410194	11,24656868	34,22
Red blood cell distribution width (RDW)	602	1,020432509	1,000831602	-1,598094344	6,982183933	0
Potassium	370	-0,001845544	1,002074329	-2,283079386	3,401634932	38,54
Sodium	368	0,001171902	1,000792239	-5,246945858	4,096930027	38,87

Yeniden Örnekleme (Resampling)

Dengesiz veri setlerinde sınıf dağılımını değiştirerek sınıf dağılımını dengeli hale getirmek için bazı ön işleme adımları kullanılmaktadır. Sınıf dağılımı dengeli hale getirilirken Yeniden Örnekleme (Resampling) teknikleri kullanılmaktadır. Yeniden örnekleme, veri setini gerçek veri seti kullanılarak yeniden yapılandırma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Yeniden örnekleme yöntemleri üç başlık altına toplanabilmektedir (Ankara ve Sahinturk, 2019; Galar ve diğ., 2011; Haixiang ve diğ., 2017):

Rastgele Veri Çıkarma (Random Undersampling): Sayıca çok olan sınıf örneklerinin rastgele ortadan kaldırılması ile dengesizliği gidermeyi amaçlayan yeniden örnekleme yöntemidir (Ankara ve Sahinturk,

2019).

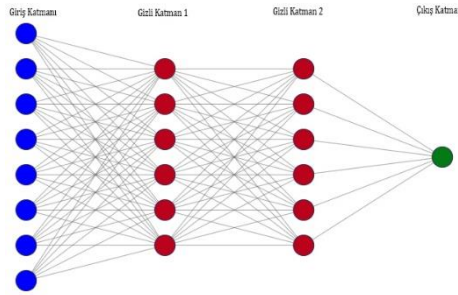
Rastgele Aşırı Örnekleme (Random Oversampling): Azınlık sınıf etiketi örneklerini sayısı fazla olan sınıf etiketine yaklaştırmak için rastgele çoğaltılması ile dengesizliği gidermeyi amaçlayan yeniden örnekleme yöntemidir (Ankara ve Sahinturk, 2019).

Sentetik Veri Üretme (Synthetic samples): Verilerin yetersiz olması halinde orijinal veri seti ele alınarak yapay veri üretilerek dengesizliği gidermeyi amaçlayan yeniden örnekleme yöntemidir. Bu yöntemde kullanılan yaygın algoritmalar SMOTE, ADASYN ve Geometric SMOTE gibi algoritmalar (Ankara ve Sahinturk, 2019).

Çalışmada sınıf dağılımını dengelemek için; Python imbalanced-learn kütüphanesi kullanılmıştır. Bu kütüphane kullanılarak; Random OverSampler, Random UnderSampler, SMOTE, Geometric SMOTE, ADASYN algoritmaları ile yeniden örnekleme yapılmıştır.

Derin Sinir Ağları (Deep Neural Networks)

DSA, giriş katmanı, çıkış katmanı ve birden çok gizli katmanı olan bir sinir ağı olarak ifade edilmektedir. DSA'nın her katmanında ele alınan problemle ilgili çıkarılan öznitelikler öğrenilmekte ve söz konusu katmanda öğrenilen öznitelikler, kendisinden sonra gelen katman için girdi değerlerini oluşturmaktadır. Bu sayede birinci katmandan başlayarak nihai katmana doğru özniteliklerin öğrenilerek gidildiği bir ağ yapısı oluşturulmuş olmaktadır (Tokmak ve Küçüksille, 2019). Bir giriş katmanı, 2 adet gizli katman ve bir çıkış katmanına sahip bir DSA Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Derin sinir ağı yapısı
Figure 3. Deep neural network structure

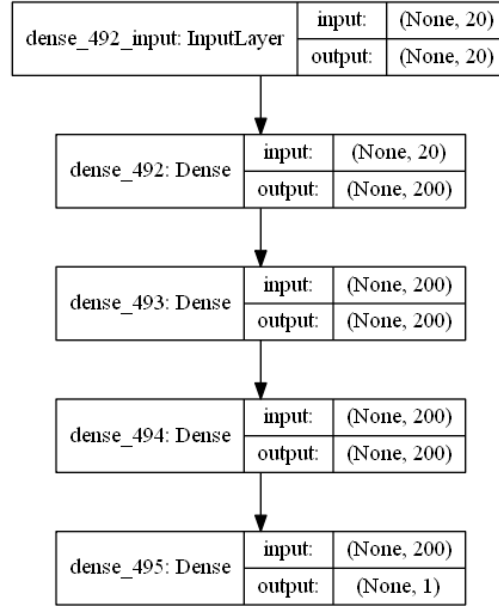
Şekil 3'teki DSA yapısında dairelerle temsil edilen nöronlar, ağırlık değeri, bias ve aktivasyon fonksiyonuna sahiptirler. Nöronlar giriş değeri ve ağırlıkların çarpılmasından sonra, bias değeri eklenerek bir çıkış değeri üretirler bu çıkış değerini kontrol etmek için yani nöronun aktif olup olmayacağına karar vermek için aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır.

DSA; doğal dil işleme, görüntü işleme, ses tanıma, zaman serisi analizi, zararlı yazılım tespiti gibi birçok alanda kullanılmaktadır ((Barros ve diğ., 2017; Cui ve diğ., 2018; Kolosnjaji ve diğ., 2016; Mezgec ve diğ., 2019; Tokmak ve Küçüksille, 2019; Zeyer ve diğ., 2017)

Bu çalışmada veri seti ön işleme adımlarından sonra elde edilen öznitelikler kurulan bir DSA ile modellenmiştir. DSA modeli Python kullanılarak oluşturulmuş ve sklearn, numpy, keras pandas kütüphaneleri kullanılmıştır. Modelleme sırasında verilerin rastgele %80'i eğitim, %20'si test için ayrılmıştır. Kurulan DSA modeli bir adet giriş katmanı, 3 adet gizli katman ve 1 adet çıkış katmanı içermektedir. Gizli katmanlar 200 adet düğümünden oluşmaktadır. Giriş katmanı ve gizli katmanlarda aktivasyon fonksiyonu olarak Rectifier Lienar Units (RELU) kullanılmıştır. Çıkış katmanında kullanılan aktivasyon fonksiyonu ise sigmoid'dir. Modeli eğitmeden önce öğrenme sürecinin yapılandırması işlemi compile fonksiyonu yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu fonksiyona öğrenme hızını ayarlayan fonksiyonu belirlemek için gerekli olan optimizasyon parametresi olarak adam, model ikili bir sınıflandırma içerdiği için loss parametresi binary_crossentropy ve modelin performansını değerlendirmek için kullanılacak fonksiyonu belirlemek için verilen metrics parametresine accuracy değerleri verilmiştir. Son olarak model

fit fonksiyonu kullanılarak eğitilmiştir. fit fonksiyonuna modeli eğitmek için kaç defa çalışacağını belirleyen epoch parametresi 30 ve verileri kaçar kaçar alacağını belirleyen batch_size parametresi 10 olarak verilmiştir. Kurulan model Şekil 4’te gösterilmiştir.

Kurulan modelin başarımının değerlendirilebilmesi için kullanılan; doğru sınıflandırılan sınıf örneklerinin oranı olan doğruluk değeri Eşitlik 1’de, pozitif olarak tahmin edilen örneklerin gerçekte ne kadarının pozitif olduğunu ifade eden kesinlik (precision) değeri Eşitlik 2’de, gerçek pozitif değerlerin ne kadarının doğru olduğunu ifade eden duyarlılık (recall) değeri Eşitlik 3’te, kesinlik ve duyarlılık değerlerinin harmonik ortalaması olan F1-skoru (F1 score) Eşitlik 4’te, ROC AUC eğrisi çizilirken kullanılan TPR değeri Eşitlik 5’te ve FPR değeri Eşitlik 6’da gösterilmiştir.



Şekil 4. Kurulan DSA modeli
Figure 4. Deep Neural Networks structure

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (1)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$\text{F1 - Skor} = \frac{2 \times \text{Duyarlılık} \times \text{Kesinlik}}{\text{Duyarlılık} + \text{Kesinlik}} \quad (4)$$

$$\text{TPR} = \frac{TP}{FN + TP} \quad (5)$$

$$\text{FPR} = \frac{FP}{FP + TN} \quad (6)$$

Sağlık alanında ML modelleri ile alınabilecek klinik kararlar, hastaların yaşamları açısından önemlidir. Bu nedenle, bu uygulamalarda, hem doğru hem de yorumlanabilir tahmin modellerine sahip olmak önem arz etmektedir (Aljame ve diğ., 2020). Bu bağlamda modeli yorumlamak amacıyla, tahmin

edilen çıktının belirlenmesinde her bir özelliğin önemini değerlendirmek için SHAP tekniği (Lundberg ve Lee, 2017) kullanılmıştır. SHAP tekniğinde her özelliğin tahmine katkısını açıklayan Shapley değerlerine dayalı olarak model yorumlanabilmektedir (Rodríguez-Pérez ve Bajorath, 2020). Ayrıca kurulan modeli kullanarak yeni girilecek veriler için tahmin yapabilmek amacıyla, Şekil 5'teki uygulama PyQt kullanılarak geliştirilmiştir.

Şekil 5. COVID-19 tahmin uygulaması

Figure 5. COVID-19 prediction application

BULGULAR (RESULTS)

COVID-19 hastalığının neden olduğu dünya çapında, halk sağlığını tehdit eden salgın; farklı araştırma gruplarını ve araştırmacıları COVID-19'un teşhisini olabildiğince otomatikleştirmek amacıyla ML uygulamaları geliştirmeye motive etmiş durumdadır.

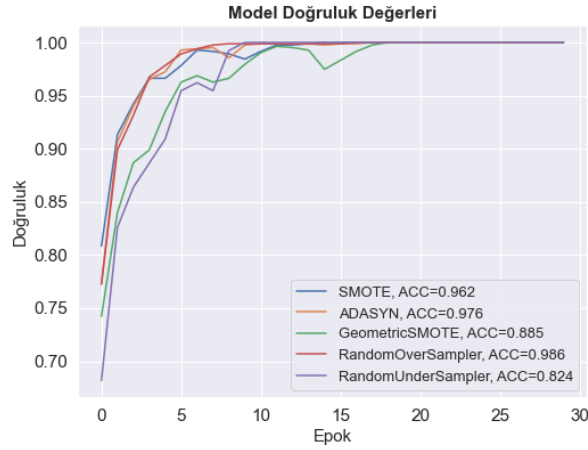
Bu çalışmada, COVID-19 hastalığının tespiti amacıyla, veri seti içindeki sınıf dengesizliği yeniden örnekleme metotları kullanılarak giderilmiş ve kurulan DSA modeline girdi olarak kullanılmıştır. Kurulan DSA modeli ile veriler eğitilmiş ve teste tabi tutulmuştur. Çalışmada kurulan tespit sistemi ile hem DSA modelinin performansı hem de yeniden örnekleme metotlarının performansı, model performans ölçütleri ile ortaya konmuştur ve Çizelge 2'de gösterilmiştir ve Çizelge 3' te ise önerilen çalışma ve aynı veri setini kullanan çalışmaların kullandığı modeller ve bu modellerden elde ettiği en yüksek oranlar gösterilmiştir.

Modelin eğitilip test verisi ile test edilmesinden sonra elde edilen en yüksek doğruluk oranı %98,5 ile Random OverSampler algoritması ile elde edilmiştir. Yine modelin başarımını belirleyen kesinlik oranı %99, duyarlılık oranı %99, F1 skoru %99, ROC-AUC oranı %98,5 olarak elde edilmiştir. Doğruluk oranı en düşük olan algoritma ise; %82,3'lük doğruluk oranı elde edilen Random UnderSampler algoritması olmuştur. Bu algoritmanın diğer başarımları de çalışmada kullanılan diğer algoritmalarla göre daha düşük oranda olup kesinlik oranı %83, duyarlılık oranı %82, F1 skoru %82, ROC-AUC oranı %86,2 olarak elde edilmiştir. Sentetik veri üretme algoritmaları SMOTE ve ADASYN algoritmaları ile %95 oranının üzerinde değerlere erişerek birbirine yakın sonuçlar alınmıştır. Ancak Geometric SMOTE algoritması %88'ler düzeyinde kalarak bu algoritmaların gerisinde kalmıştır. Kullanılan modelin yeniden örnekleme algoritmaları ile elde edilen doğruluk değerleri Şekil 6'da ve ROC-AUC eğrisi Şekil 7'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. Model performans ölçütleri

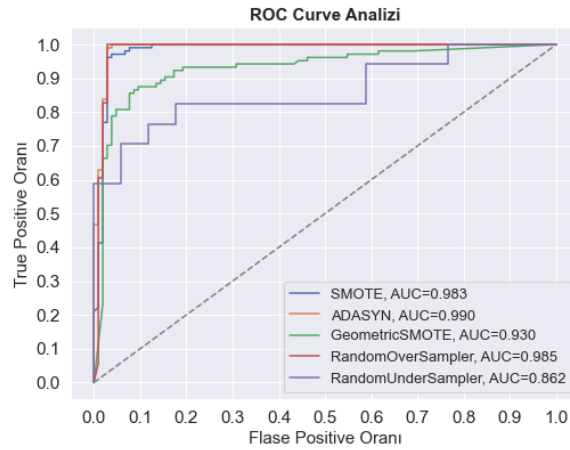
Table 2. Model performance metrics

Algoritmalar	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1-skoru (F1-score)	ROC AUC	Doğruluk (Accuracy)
SMOTE	0,96	0,96	0,96	0,983	0,961
Geometric SMOTE	0,88	0,88	0,88	0,930	0,884
ADASYN	0,98	0,98	0,98	0,990	0,976
Random UnderSampler	0,83	0,82	0,82	0,862	0,823
Random OverSampler	0,99	0,99	0,99	0,985	0,985



Şekil 6. Doğruluk değerleri

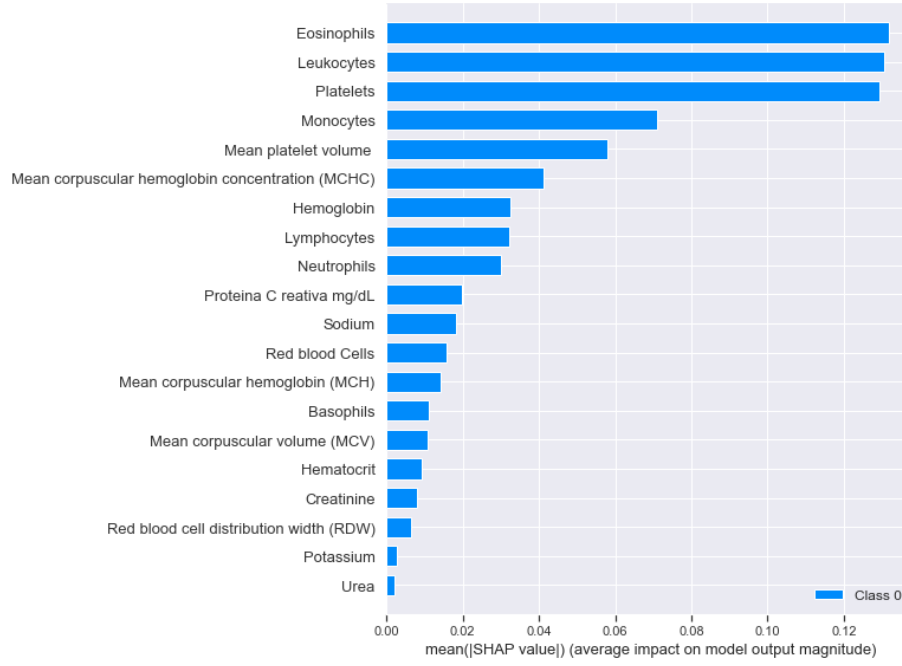
Figure 6. Accuracy values



Şekil 7. ROC-AUC eğrisi

Figure 7. ROC-AUC Curve

Şekil 8, COVID-19'un pozitif durumları ile ilgili olarak özellik önemini, her bir özelliğin modelin doğruluğuna katkısını göstermektedir. Bu grafikte sadece doğruluğu en yüksek olan Random OverSampler algoritmasına ait modelde elde edilen SHAP değerleri gösterilmiştir. Buna göre "Eosinophils", "Leukocytes", "Plateles" niteliklerinin COVID-19 pozitif vakaların belirlenmesinde tahmin modeline en fazla katkıda bulunduğu görülmektedir. En az katkısı olan niteliklerin ise "Potassium" ve "Urea" olduğu görülmektedir.



Şekil 8. SHAP değerleri

Figure 8. SHAP values

Çizelge 3. İlgili çalışmaların yöntemleri ve model performans ölçütleri

Table 3. Methods of related works and performance metrics

Çalışmalar	Model	Doğruluk (Accuracy)	Duyarlılık (Recall)	Özgüllük (Specificity)	ROC AUC	F1-Skoru (F1-Score)
Soares, 2020	SVM		70,25%	85,98	86,78%	-
Banerjee vd., 2020	ANN, LR, GLMNET, RF	61-90	43-85	81-91	65-95	-
de Moraes Batista vd., 2020	NN, RF, GBT, LR, SVM		68	85	85	78
de Freitas Barbosa vd., 2021	MLP, SVM, RT, RF, BN, NB	95,159	96,8	93,6		
Avila vd., 2020	NB	76,6				
Yavaş vd., 2020	YSA	90	90			91
Schwab vd., 2020	LR, NN, SVM, RF, GB		75	59	66	
Czako vd., 2020	RF, ET	98,7			98,3	98,2
AlJame vd., 2020	ET, RF, LR, XGBoostT	99,94	99,38	99,99	99,94	
Önerilen Çalışma	DSA	98,5	99		98,5	99

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

COVID-19 hastalarının erken dönemde tespit edilmesi ve hastaya zamanında müdahale edilmesi salgının yayılmasının önlenmesi için kritik bir öneme sahiptir. Son yapılan çalışmalarda, COVID

hastalarının ilk taraması için rutin kan testlerinin kullanıldığı ortaya konmuş ve kan testlerinin nispeten hızlı, daha ucuz olması ve birçok sağlık kuruluşlarında kolayca yapılabilir olması gerçeğiyle desteklenmiştir. Bu araştırmalarda Navie Bayes (NB), Bayes Ağları (Bayesian Networks: BN), Yapay Sinir Ağları (ANN:Artificial Neural Network), Rastgele Orman (RF: Random Forest), Ekstra Ağaçlar (Extra Trees: ET), Lojistik Regresyon (Logistic Regression: LR), Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machines: SVM), Gradient Boosted Ağaçları (Gradient Boosted Trees: GBT), XGBoost, Gradient Boosting (GB), Kollektif Öğrenme (Ensemble Learning: EL), GLMNET (Lassoelastic-Net Regularized Generalized Linear), Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi Layer Perceptron: MLP) gibi farklı ML algoritmaları kullanılmıştır.

Bu çalışma ile de DSA modeli kullanılmış, dengesiz sınıf dağılımının giderilmesi noktasında yeniden örnekleme algoritmalarının performansları da değerlendirilmiştir. %82,3 ile %98,5 oranında doğruluk değerlerine erişilmiştir. %98,5 ile Random OverSampler algoritması ile en yüksek doğruluk oranı elde edilmiştir. Modelin performans ölçütlerinden kesinlik oranı %99, duyarlılık oranı %99, F1 skoru %99, ROC-AUC oranı %98,5 olarak elde edilmiştir. Önerilen çalışmada elde edilen ölçütlerin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Her ne kadar AlJame vd., 2020 çalışmasının sonucunda paylaştıkları ölçütlerin %99,9 seviyelerinde olsa da; kullandıkları 19 nitelikten sadece 2 tanesi tam dolu, diğerleri ise %89,32 ile %99,77 oranında eksik veri içermektedir. Örneğin, "Albumin" niteliği için 5644 satırdan sadece 13 tanesi veri içermektedir. Dolayısıyla çalışma evrenini tam olarak temsil edip etmediği tartışılmalıdır.

Kurulan modelin bir sağlıkçı gözüyle yorumlanabilmesi noktasında modelin başarısında etkisi olan niteliklerin önem sıralaması ortaya konmuştur. Ayrıca kurulan modeli kullanarak yeni girilecek veriler için tahmin yapabilmek amacıyla bir uygulama geliştirilmiştir.

Bununla birlikte, COVID-19 teşhisinde ML modellerinin otomatik ve doğru olarak ilerletilebilmesi ve geliştirilmesi için, sağlık uzmanlarının rehberliğinde kan değerlerinin yanı sıra farklı semptomları ve/veya tıbbi görüntüleme cihazlarından alınan veriler ile birleştirildiği yüksek kaliteli veri kümeleri ile çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahsan, M. M., Gupta, K. D., Islam, M. M., Sen, S., Rahman, M., Hossain, M. S., 2020, "Study of different deep learning approach with explainable ai for screening patients with COVID-19 symptoms: Using ct scan and chest x-ray image dataset", *arXiv preprint arXiv:2007.12525*.
- AlJame, M., Ahmad, I., Imtiaz, A., Mohammed, A., 2020, "Ensemble learning model for diagnosing COVID-19 from routine blood tests", *Informatics in Medicine Unlocked*, Vol. 21, pp 100449.
- Ankara, N., Sahinturk, H., 2019, "Dengesiz Kredi Skorlama Veri Setlerinde Kolektif Öğrenme Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi", *PressAcademia Procedia*, Vol. 9, No. 1, pp 180-185.
- Avila, E., Dorn, M., Alho, C. S., Kahmann, A., 2020, "Hemogram Data as a Tool for Decision-making in COVID-19 Management: Applications to Resource Scarcity Scenarios", *ArXiv:2005.10227*.
- Banerjee, A., Ray, S., Vorselaars, B., Kitson, J., Mamalakis, M., Weeks, S., Baker, M., Mackenzie, L. S., 2020, "Use of Machine Learning and Artificial Intelligence to predict SARS-CoV-2 infection from Full Blood Counts in a population", *International Immunopharmacology*, Vol. 86, pp 106705.
- Barros, P., Parisi, G. I., Weber, C., Wermter, S., 2017, "Emotion-modulated attention improves expression recognition: A deep learning model", *Neurocomputing*, Vol. 253, pp 104-114.
- Bogu, G. K., Snyder, M. P., 2021, "Deep learning-based detection of COVID-19 using wearables data", *MedRxiv*, pp 2021.01.08.21249474.
- Cabitza, F., Campagner, A., Ferrari, D., Di Resta, C., Ceriotti, D., Sabetta, E., Colombini, A., De Vecchi, E., Banfi, G., Locatelli, M., Carobene, A., 2021, "Development, evaluation, and validation of machine learning models for COVID-19 detection based on routine blood tests", *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*, Vol. 59, No. 2, pp 421-431.
- Cascella, M., Rajnik, M., Cuomo, A., Dulebohn, S. C., Di Napoli, R., 2020, "Features, Evaluation, and Treatment of Coronavirus", *StatPearls*, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing.

- Chassagnon, G., Vakalopoulou, M., Paragios, N., Revel, M.-P., 2020, "Artificial intelligence applications for thoracic imaging", *European journal of radiology*, Vol. 123, pp 108774.
- Civit-Masot, J., Luna-Perejón, F., Domínguez Morales, M., Civit, A., 2020, "Deep learning system for COVID-19 diagnosis aid using X-ray pulmonary images", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 13, pp 4640.
- Cui, Z., Xue, F., Cai, X., Cao, Y., Wang, G., Chen, J., 2018, "Detection of malicious code variants based on deep learning", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 7, pp 3187-3196.
- Czako Z., Sebestyen G., Hangan A., 2020, "Potenciális COVID-19 fertőzés automatikus felismerése hagyományos véranalízis alapján", *XXI. Energetika-Elektrotechnika – ENELKO és XXX. Számítástechnika és Oktatás – SzámOkt Multi-konferencia*, pp 57–62.
- de Freitas Barbosa, V. A., Gomes, J. C., de Santana, M. A., Albuquerque, J. E. de A., de Souza, R. G., de Souza, R. E., dos Santos, W. P., 2021, "Heg.IA: an intelligent system to support diagnosis of Covid-19 based on blood tests", *Research on Biomedical Engineering*.
- de Moraes Batista, A. F., Miraglia, J. L., Rizzi Donato, T. H., Porto Chiavegatto Filho, A. D., 2020, "COVID-19 diagnosis prediction in emergency care patients: a machine learning approach" (preprint), *Epidemiology*. <https://doi.org/10.1101/2020.04.04.20052092>
- Dlotko, P., Rudkin, S., 2020, "Covid-19 clinical data analysis using Ball Mapper" (preprint), *Intensive Care and Critical Care Medicine*. <https://doi.org/10.1101/2020.04.10.20061374>
- Fan, B. E., Chong, V. C. L., Chan, S. S. W., Lim, G. H., Lim, K. G. E., Tan, G. B., Mucheli, S. S., Kuperan, P., Ong, K. H., 2020, "Hematologic parameters in patients with COVID-19 infection", *American journal of hematology*, Vol. 95, No. 6, pp E131-E134.
- Formica, V., Minieri, M., Bernardini, S., Ciotti, M., D'Agostini, C., Roselli, M., Andreoni, M., Morelli, C., Parisi, G., Federici, M., Paganelli, C., Legramante, J. M., 2020, "Complete blood count might help to identify subjects with high probability of testing positive to SARS-CoV-2", *Clinical Medicine*, Vol. 20, No. 4, pp e114-e119.
- Galar, M., Fernandez, A., Barrenechea, E., Bustince, H., Herrera, F., 2011, "A review on ensembles for the class imbalance problem: bagging-, boosting-, and hybrid-based approaches", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, Vol. 42, No. 4, pp 463-484.
- Gao, Y., Li, T., Han, M., Li, X., Wu, D., Xu, Y., Zhu, Y., Liu, Y., Wang, X., Wang, L., 2020, "Diagnostic utility of clinical laboratory data determinations for patients with the severe COVID-19", *Journal of medical virology*, Vol. 92, No. 7, pp 791-796.
- Haixiang, G., Yijing, L., Shang, J., Mingyun, G., Yuanyue, H., Bing, G., 2017, "Learning from class-imbalanced data: Review of methods and applications", *Expert Systems with Applications*, Vol. 73, pp 220-239.
- Hammoudi, K., Benhabiles, H., Melkemi, M., Dornaika, F., Arganda-Carreras, I., Collard, D., Scherpereel, A., 2020, "Deep Learning on Chest X-ray Images to Detect and Evaluate Pneumonia Cases at the Era of COVID-19", *arXiv preprint arXiv:2004.03399*.
- Jacobi, A., Chung, M., Bernheim, A., Eber, C., 2020, "Portable chest X-ray in coronavirus disease-19 (COVID-19): A pictorial review", *Clinical Imaging*, Vol. 64, pp 35-42.
- Kaggle, Einstein Data4u, 2020. <https://www.kaggle.com/einsteindata4u/covid19>, Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2020.
- Kamal, K. C., Yin, Z., Wu, M., Wu, Z., 2021, "Evaluation of deep learning-based approaches for COVID-19 classification based on chest X-ray images", *Signal, Image and Video Processing*, pp 1-8.
- Kolosnjaji, B., Zarras, A., Webster, G., Eckert, C., 2016, "Deep learning for classification of malware system call sequences", *Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence*, Cham, ss: 137–149, 2016.
- Loey, M., Smarandache, F., Khalifa, N. E. M., 2020, "Within the Lack of Chest COVID-19 X-ray Dataset: A Novel Detection Model Based on GAN and Deep Transfer Learning", *Symmetry*, Vol. 12, No. 4, pp 651.
- Lundberg, S., Lee, S.-I., 2017, "A unified approach to interpreting model predictions", *arXiv preprint arXiv:1705.07874*.

- Maghdid, H. S., Asaad, A. T., Ghafoor, K. Z., Sadiq, A. S., Khan, M. K., 2020, "Diagnosing COVID-19 pneumonia from X-ray and CT images using deep learning and transfer learning algorithms", *arXiv preprint arXiv:2004.00038*.
- Mezgec, S., Eftimov, T., Bucher, T., Seljak, B. K., 2019, "Mixed deep learning and natural language processing method for fake-food image recognition and standardization to help automated dietary assessment", *Public health nutrition*, Vol. 22, No. 7, pp 1193-1202.
- Mohammad, Tayarani, 2020, "Applications of Artificial Intelligence in Battling Against Covid-19: A Literature Review", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 142, pp 110338.
- Rajaraman, S., Siegelman, J., Alderson, P. O., Folio, L. S., Folio, L. R., Antani, S. K., 2020, "Iteratively Pruned Deep Learning Ensembles for COVID-19 Detection in Chest X-rays", *arXiv preprint arXiv:2004.08379*.
- Rodríguez-Pérez, R., Bajorath, J., 2020, "Interpretation of machine learning models using shapley values: application to compound potency and multi-target activity predictions", *Journal of computer-aided molecular design*, Vol. 34, No. 10, pp 1013-1026.
- Schwab, P., DuMont Schütte, A., Dietz, B., Bauer, S., 2020, "Clinical Predictive Models for COVID-19: Systematic Study", *Journal of Medical Internet Research*, Vol. 22, No. 10, pp e21439.
- Shilbayeh, S. A., Abonamah, A., Masri, A. A., 2020, "Partially versus Purely Data-Driven Approaches in SARS-CoV-2 Prediction", *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 16, pp 5696.
- Shoeibi, A., Khodatars, M., Alizadehsani, R., Ghassemi, N., Jafari, M., Moridian, P., Khadem, A., Sadeghi, D., Hussain, S., Zare, A., Sani, Z. A., Bazeli, J., Khozeimeh, F., Khosravi, A., Nahavandi, S., Acharya, U. R., Shi, P., 2020, "Automated Detection and Forecasting of COVID-19 using Deep Learning Techniques: A Review", *ArXiv:2007.10785*.
- Shorten, C., Khoshgoftaar, T. M., Furht, B., 2021, "Deep Learning applications for COVID-19", *Journal of Big Data*, Vol. 8, No. 1, pp 1-54.
- Singh, D., Kumar, V., Yadav, V., Kaur, M., 2020, "Deep Neural Network-Based Screening Model for COVID-19-Infected Patients Using Chest X-Ray Images", *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, pp 2151004.
- Soares, F., 2020, "A novel specific artificial intelligence-based method to identify COVID-19 cases using simple blood exams", *MedRxiv*.
- Syeda, H. B., Syed, M., Sexton, K. W., Syed, S., Begum, S., Syed, F., Prior, F., Yu Jr, F., 2021, "Role of Machine Learning Techniques to Tackle the COVID-19 Crisis: Systematic Review", *JMIR medical informatics*, Vol. 9, No. 1, pp e23811.
- T.C. Sağlık Bakanlığı, 2020. <https://covid19.saglik.gov.tr/TR-66300/covid-19-nedir-.html>, Ziyaret Tarihi: 31 Aralık 2020.
- Tokmak, M., Küçüksille, E. U., 2019, "Kötü Amaçlı Windows Çalıştırılabilir Dosyalarının Derin Öğrenme İle Tespiti", *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, Vol. 3, No. 1, pp 67-76.
- Vogels, C. B., Brito, A. F., Wyllie, A. L., Fauver, J. R., Ott, I. M., Kalinich, C. C., Petrone, M. E., Casanovas-Massana, A., Muenker, M. C., Moore, A. J., 2020, "Analytical sensitivity and efficiency comparisons of SARS-CoV-2 RT-qPCR primer-probe sets", *Nature microbiology*, Vol. 5, No. 10, pp 1299-1305.
- Yavaş, M., Güran, A., Uysal, M., 2020, "Covid-19 Veri Kümesinin SMOTE Tabanlı Örnekleme Yöntemi Uygulanarak Sınıflandırılması", *European Journal of Science and Technology*, No. Özel Sayı, pp 258-264.
- Zeyer, A., Doetsch, P., Voigtlaender, P., Schlüter, R., Ney, H., 2017, "A comprehensive study of deep bidirectional LSTM RNNs for acoustic modeling in speech recognition", *2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* ss. 2462-2466, IEEE.
- Zheng, C., Deng, X., Fu, Q., Zhou, Q., Feng, J., Ma, H., Liu, W., Wang, X., 2020, "Deep learning-based detection for COVID-19 from chest CT using weak label", *medRxiv*.