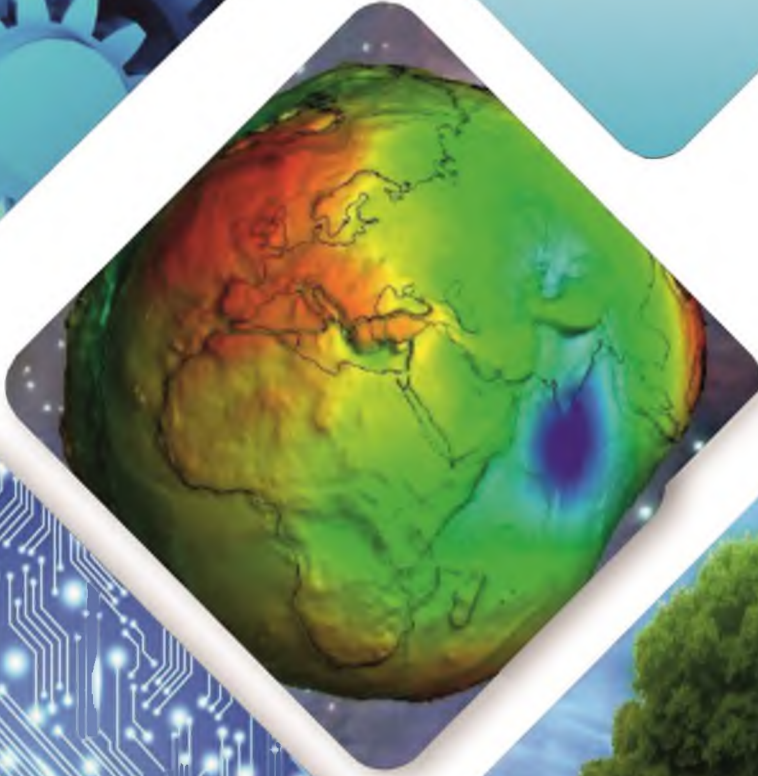




Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi

Konya Journal of Engineering Sciences



(KONJES)
E-ISSN: 2667-8055



2020 - Cilt: 8 - Sayı: 4
2020 - Volume: 8 - Issue: 4

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

HAKEMLİ DERGİDİR

OWNER/SAHİBİ

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

Chief Editor/Şef Editör

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Editors/Editörler

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

Section Editors/Alan Editörleri

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

Advisory Board/Danışma Kurulu

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

Language Editing/Yabancı Dil Editörü

Prof. Dr. Ali BERKTAY

Composition and Printing/Baskı ve Dizgi

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

Correspondance Address/ Yazışma Adresi

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

Tel : 0 332 223 88 18
Fax : 0 332 241 06 35
E-mail : konjes@ktun.edu.tr
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	8	Aralık	2020	Sayı	4
Volume	8	December	2020	Issue	4

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

ELEKTRİKLİ TANK KAPSÜLLERİNDE AKTİVASYON ZAMANI VE ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

Examination of the Relationship Between Activation Time and Electrical Resistance in Electrical Tank Primers

Mustafa DÜNDAR, Davut ÖZKAN, Aysun ŞAHİN, İhsan Çağatay ÖNCEL, Jale GÜLEN 723-732

ÇEKME YÜKÜ UYGULANMIŞ BORU YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA BİNDİRME UÇ GEOMETRİSİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

The Investigation of the Effect of the Overlap End Geometry On the Joint Strength in Pipe Bonding Joints with Tensile Load

..... **İsmail SARAÇ 733-744**

BİR FAZLI DGM DOĞRULTUCU İÇİN LCL FİLTRE TASARIMI VE AKTİF GÜÇ KONTROLÜ

LCL Filter Design and Active Power Control for Single Phase PWM Rectifier

..... **Akif KARAFİL, Harun ÖZBAY 745-756**

YÜK BARASI ÖLÇÜMLERİNE DAYALI GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

Voltage Stability Assessment by Using Local Bus Parameters

..... **Talha Enes GÜMÜŞ, Selim MERİÇ, Mustafa TURAN, Mehmet Ali YALÇIN 757-770**

RADYAL ŞEBEKELERDE DESTEK VEKTÖR REGRESYON İLE OPTİMUM KABLO TOPRAKLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Optimum Cable Bonding Design in High Voltage Cables by Regression in Radial Network

..... **Bahadır AKBAL 771-784**

DÜNYADA KARSTİK JEOPARK TURİZMİ VE JEOPARK ÖNERİ ALANI: KARAPINAR (KONYA-TÜRKİYE)

Carstic Geopark Tourism in the World and Geopark Suggestion Area: Karapınar (Konya- Turkey)

..... **Alican ÖZTÜRK, Bilgehan Yabgu HORASAN 785-797**

HİBRİD KONTROLLÜ TABAN İZOLASYONLU SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU

Optimization of Base Isolated Hybrid Control Systems

..... Serdar ULUSOY 812-827

GENLEŞTİRİLMİŞ CAM TAKVİYELİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Manufacturing of Expanded Glass Reinforced Syntactic Foam Metal and Investigation of Microstructure and Mechanical Properties

..... Büşra ŞAHİN, Ali GÖKŞENLİ 798-811

SYNTHESIS OF QUASI-SPHERICAL SILVER NANOPARTICLES BY CHEMICAL REDUCTION ROUTE USING DIFFERENT REDUCING AGENTS

Yarı Küresel Gümüş Nanopartiküllerin Farklı İndirgeyiciler Kullanarak Kimyasal İndirgeme Yöntemiyle Sentezi

.....Ayşe KURT, Yasemin ÇELİK (English) 828-838

TWİTTER VERİLERİNDEN DOĞAL DİL İŞLEME VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE HASTALIK TESPİTİ

Disease Detection From Twitter Data Using Natural Language Processing and Machine Learning

..... Ali ÖZTÜRK, Üsame DURAK, Fatma BADILLI 839-852

A NOVEL APPROACH TO HEART ATTACK PREDICTION IMPROVEMENT VIA EXTREME LEARNING MACHINES CLASSIFIER INTEGRATED WITH DATA RESAMPLING STRATEGY

Veri Yeniden Örnekleme Stratejisi ile Bütünleştirilmiş Aşırı Öğrenme Makineleri Sınıflayıcıları ile Kalp Krizi Tahminlerinin İyileştirilmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım

..... Ahmet SAYGILI (English) 853-865

ÇÖZELTİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMİYLE KAYA TUZU ÜRETİMİ

Rock Salt Production by Solution Mining Method

..... Niyazi BİLİM, Emre KARAKAYA 866-875

PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISI VE HASAR DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ

Blast-Induced Ground Vibration and Damage Assessment Parameters

.....Bilgehan KEKEÇ, Dhikra GHILOUFI 876-888

ELEKTRİK MOTORLARINDA UYGULANAN BAKIM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ, KARŞILAŞTIRILMASI VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ETKİSİ

The Investigation and Comparison of Maintenance Methods Applied in Electric Motors and The Effect of Remote Access to Predictive Maintenance

..... Abdülsamed TABAK, Mehmet ÖZKAYMAK 889-905

A NEW APPROACH FOR RULE ESTIMATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM: A CASE STUDY FOR PUBLIC TRANSPORT MAINTENANCE SYSTEM

Bulanık Çıkarım Sisteminde Kural Tahmini için Yeni Yaklaşım: Toplu Taşıma Bakım Sistemi İçin Bir Örnek Olay Çalışması

..... Melike ERDOĞAN, İhsan KAYA (English) 906-915

KISIT PROGRAMLAMA VE HEDEF PROGRAMLAMA ENTEGRASYONU İLE VARDİYA ÇİZELGELEMESİ: HİDROELEKTRİK SANTRAL UYGULAMASI

Shift Scheduling with Constraint Programming and Goal Programming Integration: Hydroelectric Power Plant Case

..... Evrencan ÖZCAN, Hacı Mehmet ALAKAŞ, Ayşe YELEK, Tamer EREN 916-929

TDY 2007 VE TBDY 2018 YÖNETMELİKLERİNE GÖRE YAPI YÜKSEKLİĞİNİN TABAN KESME KUVVETİ VE TEPE DEPLASMANI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Investigation on The Effect of Building Height on Base Shear Force and Top Displacement According to Turkish Earthquake Code 2007 and 2018

..... İsmail ÜNSAL, Fatih Ali ÖNCEL, Mehmet Fatih ŞAHAN 930-942

YAPI ÜRETİM SÜRECİNDEKİ İŞ KAZALARI ŞİDDETİNİN ÖN BİLGİLENDİRİLMİŞ YAPAY ÖĞRENME METODU İLE TAHMİNİ

Estimation of the Severity of Occupational Accidents in the Building Process with Pre-Informed Artificial Learning Method

.....Mustafa TÜRKER, Recep KANIT 943-956

ALÜMİNYUM HİDROKSİT KRİSTALİZASYONU ÜZERİNE LİTYUM SAFSIZLIĞININ ETKİSİ

Effect of Lithium Impurity upon Aluminum Hydroxide Crystallization

..... Ayhan Abdullah CEYHAN, Halil İbrahim TEMİZ 957-969



KONUT YAPILARININ MALİYET TAHMİNİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN PERFORMANS ANALİZİ

Performance Analysis of Methods Used in the Cost Estimation of Residential Buildings

..... Mehmet Şükrü ÖZMADEN, Mürsel ERDAL 970-985



ELEKTRİKLİ TANK KAPSÜLLERİNDE AKTİVASYON ZAMANI VE ELEKTRİKSEL DİRENÇ DEĞERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ

¹Mustafa DÜNDAR , ²Davut ÖZKAN , ³Aysun ŞAHİN , ⁴İhsan Çağatay ÖNCEL ,
⁵Jale GÜLEN 

^{1,2,3,4}MKE Kurumu Mühimmat Fabrikası, AR-GE Müdürlüğü, 71100, Kırıkkale, TÜRKİYE

⁵Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

¹mustafadundar@mkek.gov.tr, ²davut.ozkan@mkek.gov.tr, ³aysun.sahin@mkek.gov.tr,

⁴cagatay.oncel@mkek.gov.tr, ⁵gulenj@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 30.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.05.2020)

ÖZ: Kapsüller, genellikle primer patlayıcı içerikli, mühimmat sisteminin ateşleme serisinin ilk elemanlarıdır. Farklı tip ve tasarımda olmalarına rağmen fonksiyonel olarak “elektrikli” ve “darbeli” olarak iki grupta sınıflandırılabilir (Yıldırım, 2013). Elektrikli kapsüller, silah sistemi tarafından uygulanan elektrik akımı ile aktive olurlar ve bu akıma karşı hassas bir primer patlayıcı ve akımı patlayıcıya iletebilecek, patlayıcı ile temas halinde bulunan bir iletken telden oluşurlar (Matyas ve Pachman, 2013).

Bu çalışmada tank mühimmatı kapsüllerinin tasarımı sırasında kullanılan direnç tellerinin kapsüllerin aktivasyon zamanı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Kapsüller farklı biçimlerde tasarlanmış ve bu tasarımların zaman üzerindeki etkilerini belirlemek için fonksiyon testine tabi tutulmuşlardır.

Anahtar Kelimeler: Aksiyon zamanı, elektriksel direnç, iletken tel, kapsül, tank, mühimmat

Examination of The Relationship Between Activation Time and Electrical Resistance in Electrical Tank Primers

ABSTRACT: Primers are cups which generally include pimer explosive and are the first step of explosive trains. Despite their different type and desing, they can be classified as “electrical” and “percussion” functionally (Yıldırım, 2013). Electrical primers are activated by electric current and include primer explosive which is affected by electric current and conducting wire which cunducts the current to the primer explosive (Matyas ve Pachman, 2013).

In this study, the effects of the resistance wires used in the design of the tank ammunition primers on the activation time of the primers were examined. The primers are designed in different configurations and subjected to function time tests and it has been tried to show how different designs affect time.

Key Words: Action time, electrical resistance, conductive wire, capsule, tank, ammunition

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kapsüller, mühimmat sistemlerinde ateşleme serisinin ilk elemanlarıdır ve sistemde ilk ateşlemeyi sağlarlar. Mühimmatın türüne ve görevine göre kendi içinde farklı tür ve tasarımları olmasına rağmen, temelde, fiziksel bir uyarıdan etkilenip aktifleşebilen duyarlı primer patlayıcı kimyasal ve bu patlayıcının istenen fonksiyonu yapmasını sağlayan genellikle metal malzemeden uygun tasarımlı dış gövdeden

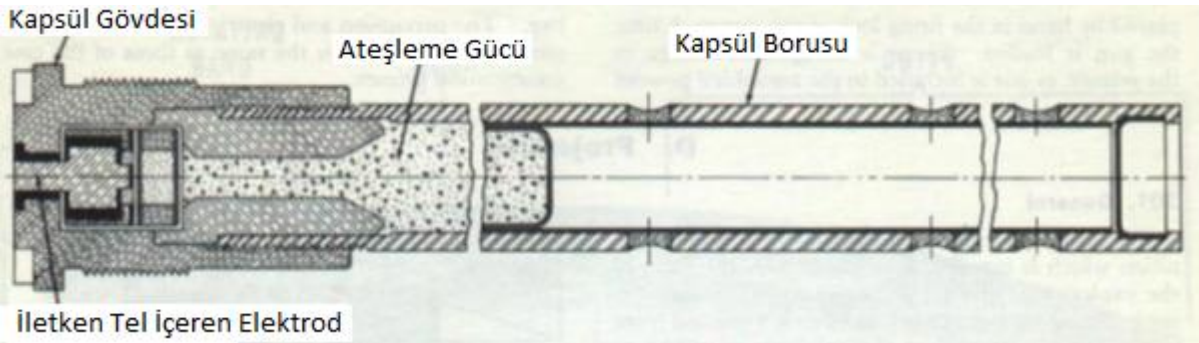
oluşurlar (Yaşar, 1979). İçerdikleri kimyasal maddeye “kapsül eczası” denir. Ateşleme amaçlı kullanılan asetillenmiş ağır metaller, alüminyum, çeşitli amonyum tuzu bileşikleri gibi pek çok kimyasal vardır (Hazardous chemicals- Explosives).

Spesifik olarak tasarımlara sahip oldukları için yapısal olarak sınıflandırmak zordur. Ancak fonksiyonel olarak “elektrikli” ve “darbeli” olarak iki sınıfta gruplandırılabilir. Darbeli (veya çarpmalı) kapsül, yüksük, örs ve ikisi arasında bulunan ezadan oluşur. Silahın tetikleyicisi tarafından uygulanan vurma etkisi ile aktifleşir ve ateşleme serisini başlatır. Elektrikli kapsüllerde ise silah tetikleyici iğnesi tarafından kapsüle elektrik akımı uygulanır. Kapsül içinde bu akımı ileterek devreyi kapatan ve elektrik akımına duyarlı ecza ile temas halinde bulunan iletken bir tel vardır. Akım ile kızaran tel eczayı aktifleştirir ve ateşleme serisini başlatır (Davis, 2018, EMO.org, 2020)).

TANK MÜHİMMATI KAPSÜLLERİ (CAPSULES OF TANK AMMUNITION)

Tank mühimmatı kapsülleri elektrikli kapsüllerdir ve dünya üzerindeki yaygın üretim örneklerinde iki ana parçadan oluşur. İlk parça gövdedir. Gövde ilk ateşleyici elektrot ve hızlandırıcı bir busterden oluşur. İkinci parça ise alev borusudur. Alev borusu delikli pirinç bir borudur ve barut temelli patlayıcı bulundurur. Yanan barutun ürettiği alev bu borunun deliklerinden geçerek mühimmatın kovanının içindeki fırlatıcı hakkını yakarak patlatma işlemi başlatır.

Burada bir ateşleme zinciri söz konusudur. Kapsül içinde ateşleme 3 adımda gerçekleşir. Birinci adım, ilk ateşleme için gerekli olan enerjinin verildiği ve kapsülün bu enerjiye gösterdiği tepki adımıdır. Burada ateşleme “elektrot” adı verilen, primer patlayıcı ve bu patlayıcı ile temas halinde olan iletken bir telden meydana gelen parça ile sağlanır. Tankın ateşleyicisinden verilen akım iletken teli kızdırarak primer patlayıcının yanmasını sağlar ve ateşleme serisi başlar (Meyer ve ark., 2007). İkinci adım, ilk ateşlemenin hızlandırıldığı kısımdır. İlk ateşlemeyi sağlayan primer patlayıcı patlama hızı çok yüksek fakat tahribat gücü zayıf bir maddedir. İlk ateşleyiciden gelen enerji, hızlandırıcı içindeki yanıcı maddeyi kolay bir şekilde yakarak enerjinin artmasını sağlar. Üçüncü adım, alev borusu içindeki yanıcı malzemenin yanarak yüksek bir enerji ürettiği adımdır. Üretilen bu yüksek enerji sayesinde mühimmatın fırlatma sistemi aktive edilir. Böylece ateşleme zinciri tamamlanmış olur (Yaşar, 1979). Şekil-1’de bir tank mühimmatı kapsülünün ara kesit görseli verilmiştir.



Şekil 1. Bir elektrikli tank mühimmatı kapsülüne ait ara kesit görseli(Case elec. Primer, 2019)

Figure 1. Bir elektrikli tank mühimmatı kapsülüne ait ara kesit görseli(Case elec. Primer, 2019)

Aktivasyon Zamanı ve Elektriksel Direnç (Activation Time and Electrical Resistance)

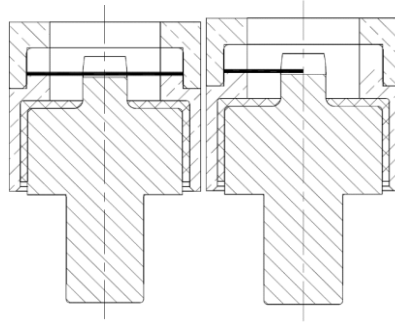
Bir mühimmatın fonksiyonel açıdan başarılı olduğunun söylenebilmesi için spesifik bazı kriterleri karşılayabilmesi gerekir. Bu kriterlerden biri de ateşlenme süresidir. Sistemin hedef unsura karşı başarılı olabilmesi için en uygun zamanda ateşlenip silahı terk etmesi gerekir. Bu kriter ise ateşleme sisteminin uygun bir şekilde aktive olması ile sağlanır. Burada ifade edilen ateşleme sistemi elemanı olan kapsülün aktivasyon zamanıdır.

Aktivasyon Zamanı: Kapsülün patladığı zaman oluşturduğu maksimum basıncın %10'una ulaşılması için geçen süredir. Bu süre birinci ve ikinci adımın, yani elektrot ve hızlandırıcının tam yanma göstergesidir. Alev borusunun birinci sıradaki deliğine bağlanan basınç ölçerlerle ölçülür ve 120 mm tank mühimmatı kapsülleri için bu süre 3 ms olarak tasarlanmıştır. Aktivasyon zamanını kapsülün tasarımı süresince birçok parametre etkilemektedir. En önemli parametre ise elektrotta oluşan elektriksel dirençtir.

Elektriksel Direnç: Tank mühimmatı kapsülleri elektriksel ateşleme ile aktifleşen kapsüllerdir ve bu kapsüllerin elektrotlarında bulunan tellerde bir direnç oluşur. Silah sistemi tarafından sağlıklı ve güvenli bir ateşlemenin olabilmesi için tasarımda kapsül içinde oluşacak direnç değeri 0,9-2,5 ohm aralığında kısıtlanmıştır.

Elektriksel direnç ile aktivasyon zamanı arasında ters orantı ilişkisi vardır. Direnci oluşturan iletken telin seçiminde en önemli faktör tel çapıdır. Tel çapı küçüldükçe elektriksel direnç artar ama aynı zamanda aktivasyon zamanı iyileşir. Ters olasılıkta ise elektriksel direnç azaldıkça aktivasyon zamanı artar. Burada önemli olan durum ayrı ayrı en iyi iki parametrenin birleşiminden ziyade iki parametrenin oluşturduğu en ideal yapıdır.

Bu çalışmada farklı özelliklere sahip iletken tellerle üretilmiş elektrotların aktivasyon zamanı üzerindeki etkileri incelenmiş ve ideal tasarım ortaya konulmaya çalışılmıştır. Çalışma süresince 30 µm, 40 µm ve 45 µm çaplara sahip krom-nikel alaşım 3 tip tel kullanılmıştır. 40 ve 45 µm çaplı teller elektrotlara seri, 30 µm çapa sahip teller ise paralel olarak bağlanmıştır. Tellerin seri ve paralel bağlanmaları Şekil-2'de gösterilmiştir. Bağlama işlemi elektrot üzerinde açılan kanallara havalı presle telleri puntalama yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda 40 ve 45 µm çaplı teller paralel bağlı konumda yüksek aktivasyon zamanı, 30 µm çaplı teller ise seri durumda yüksek direnç değeri gösterdikleri için bu çalışmada değerlendirme dışında bırakılmışlardır.



Şekil 2. Elektrotların paralel (çift köprü) (solda) ve seri (tek köprü) (sağda) bağlanması

Figure 2. Connecting of electrodes parallel (double bridge)(left)and seri (odd bridge) (right)

Test-1 (Test-1)

Bu denemede 40 ve 45 µm tellerle seri bağlı olarak üretilen elektrotlar kapsül gövdesine monte edilerek fonksiyon testi gerçekleştirilmiştir. Test açık havada ortam sıcaklığının 20-22°C olduğu koşullarda 40 µm çaplı tellere sahip elektrotlar "A Grubu", 45 µm çaplı tellere sahip elektrotlar "B Grubu" olarak adlandırılmıştır. Bu deneyde amaç aynı bağlanma biçimine sahip elektrotlarda tel çapının aktivasyon zamanı üzerindeki etkisini ölçmektir. Her iki grubun özellikleri Çizelge-1'de, test sonuçları A Grubu için Çizelge-2'de, B Grubu için Çizelge-3'te verilmiştir.

Çizelge 1. Farklı yapıda üretilen elektrotların özellikleri**Table 1.** Characteristics of electrodes produced different routes

Grup Adı	Grup Yapısı
A Grubu	40 µm çaplı ve seri bağlı telden oluşan elektrotla üretilmiş 4 numune
B Grubu	45 µm çaplı ve seri bağlı telden oluşan elektrotla üretilmiş 4 numune

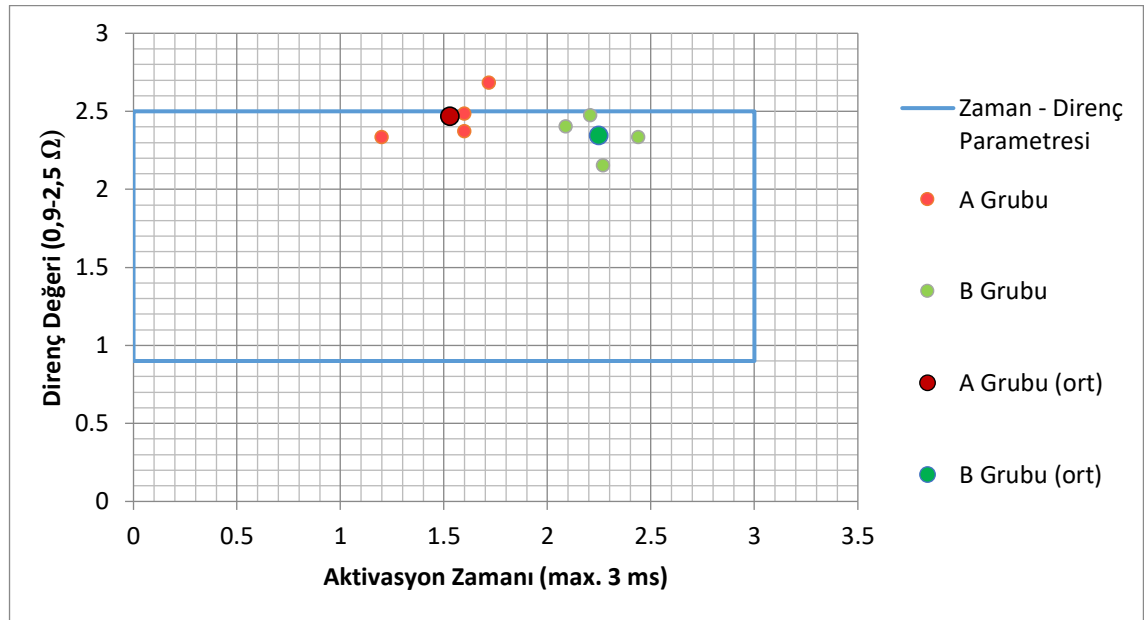
Şekil-3'te her iki gruba ait sonuçların dağılımı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır. A Grubu B Grubuna göre daha kısa aktivasyon zamanı sonuçları vermiştir. Ancak tel çapının daha küçük olması nedeniyle elektriksel direnç değerleri yüksek çıkmıştır. B Grubunun sonuçları ise daha birbirine yakın ve düzgün olsa da teknik isterler sınırına yakın sonuçlar vermişlerdir. Değerlendirmede sadece zaman değil direnç de düşünüldüğünde; iki tasarım açısından B Grubunun A Grubuna kıyasla daha ideal olduğu söylenebilir. Çünkü B Grubu hem aktivasyon zamanı isterleri aralığındadır, hem de elektriksel direnç isterini karşılamıştır.

Çizelge 2. A Grubu test sonuçları**Table 2.** Results of A group test

Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	2,33	1,20
2. numune	2,48	1,60
3. numune	2,37	1,60
4. numune	2,68	1,72
ortalama	2,465	1,53

Çizelge 3. B Grubu test sonuçları**Table 3.** Results of B group test

Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	2,47	2,44
2. numune	2,15	2,27
3. numune	2,4	2,09
4. numune	2,44	2,33
ortalama	2,34	2,25



Şekil 3. A ve B Grubu numunelerin Aktivasyon Zamanı – Direnç grafiği
Figure 3. Activation time versus Strength of A and B group samples

Ancak her iki tasarımın da direnç kriteri üst sınıra yakındır. Elektriksel direnç için teknik ister (0,9-2,5 ohm aralığı) üst sınırına yakın (ve hatta bazı numunelerin bu sınırı aşması) üretim pratiği açısından zor durum oluşturabilir.

Aktivasyon Zamanı tellerin seri bağlanması ile iyileştirilmiştir, ancak seri bağlama direnç değerlerini iki katına çıkarmıştır. Bu nedenle paralel bağlı olarak daha iyi fonksiyon gösterebilecek bir tasarım oluşturulmaya çalışılmıştır

Test-2(Test-2)

Bir başka denemede tel çapları ile birlikte tellerin bağlanma şekilleri ve boylarının da aktivasyon zamanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. 30 ve 40 μm çaptaki teller farklı boylarda ve bağlanma şekillerinde test edilmiştir. Montaj esnasında tasarımda değişiklik yapılarak tellerin patlayıcıya temas ettikleri mesafe düşürülmüştür. Çizelge-4’te farklı biçimlerde üretilen elektrotların özellikleri verilmiştir

Çizelge 4. 4 Farklı yapıda üretilen elektrotların özellikleri

Table 4. Characteristics of electrodes produced different routes

Grup Adı	Grup Yapısı
C Grubu	30 μm çaplı ve paralel bağlı kısa telden oluşan elektrotla üretilmiş 7 numune
D Grubu	30 μm çaplı ve paralel bağlı uzun telden oluşan elektrotla üretilmiş 5 numune
E Grubu	40 μm çaplı ve seri bağlı kısa telden oluşan elektrotla üretilmiş 6 numune
F Grubu	40 μm çaplı ve seri bağlı uzun telden oluşan elektrotla üretilmiş 5 numune

Bir önceki çalışmada tel çapının direnç üzerinde olumlu etki yaptığı ancak aktivasyon zamanını olumsuz etkilediği söylenmişti. Ancak tel çapının düşürülmesi kesit-direnç arasındaki ters orantı nedeniyle direnç değerinde yükselmeye neden olacaktır. Bu durumun engellenmesi için ince çaplı teller elektroda çift köprü şeklinde paralel olarak bağlanmış, direnç düşürülmüştür. Düşük dirençten geçen

yüksek akım telin daha çabuk ısınıp primer patlayıcının daha kısa zamanda reaksiyon vermesini sağlamaktadır.

Aynı çap ve bağlanma şekillerine sahip farklı uzunluklardaki tellerin de aktivasyon zamanı test edilerek tel boyunun zaman üzerindeki etkisi ölçülmüştür. Uzunluk-direnç arasındaki doğru orantıya göre tel boyu arttıkça direncin de artması beklenir. Bu durumun aktivasyon zamanı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalara ait sonuçlar Çizelge-5, Çizelge-6, Çizelge-7 ve Çizelge-8’de verilmiştir.

Çizelge 5: 1 C Grubu Test Sonuçları

Table 5. Results of 5 C group test

Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	1,90	1,09
2. numune	2,50	1,00
3. numune	1,80	1,095
4. numune	1,90	1,07
5. numune	1,74	1,06
6. numune	1,80	1,18
7. numune	2,16	1,21
Ortalama	1,97	1,10

ÇizelgeError! No text of specified style in document.: 2 D Grubu Test Sonuçları

Table 5. Results of 6 D group test

Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	2,2	1,47
2. numune	1,97	1,08
3. numune	2,4	2,93
4. numune	1,92	1,4
5. numune	1,8	1,17
Ortalama	2,06	1,56

ÇizelgeError! No text of specified style in document.: 3 E Grubu Test Sonuçları

Table 5. Results of 7E group test

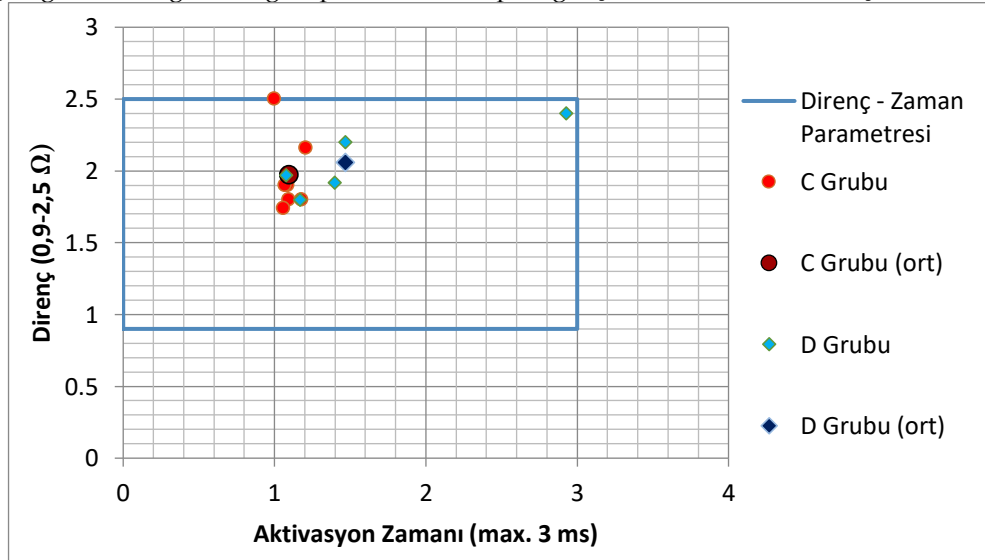
Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	1,9	1,04
2. numune	1,75	1,19
3. numune	1,6	1,12
4. numune	1,74	1,17
5. numune	1,6	1,06
6. numune	0,85	1,84
Ortalama	1,57	1,24

ÇizelgeError! No text of specified style in document.: 4 F Grubu Test Sonuçları

Table 5. Results of 8 F group test

Değerler	Direnç (Ω)	Aktivasyon Zamanı (ms)
1. numune	2,2	1,28
2. numune	1,69	1,11
3. numune	2,22	1,41
4. numune	2	1,1
5. numune	1,9	1,21
Ortalama	2,00	1,22

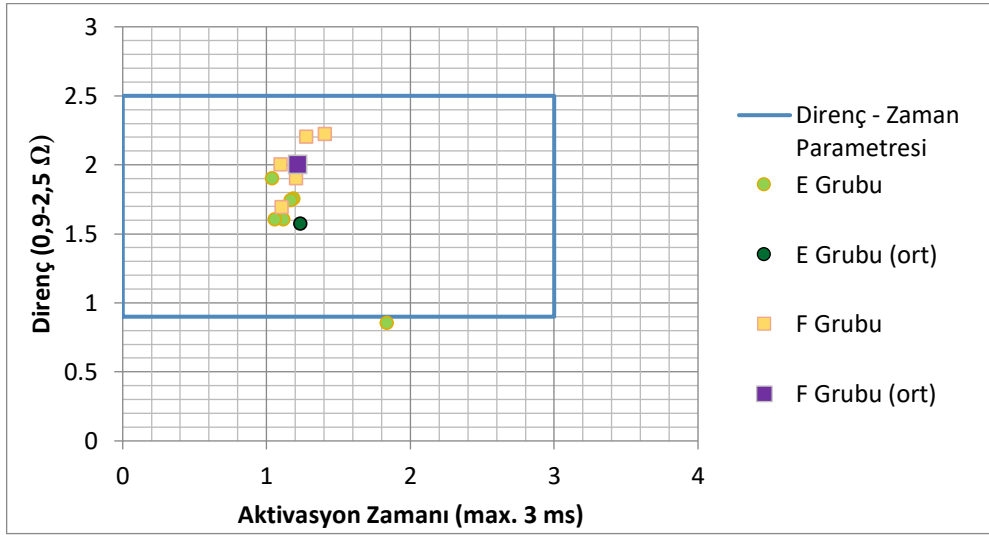
Aynı çap ve bağlanma şekillerine sahip C ve D grubu arasında kısa tellerden oluşan grubun direnç değerleri ortalaması da uzunluk-direnç ilişkisi gereği düşük çıkmıştır. Her iki grupta uygun ortalama aktivasyon zamanı göstermiş, ancak D Grubunda teknik isterin sınırına yakın sapmalar olmuştur. Eğer 2,93 ms çıkan maksimum değer ihmal edilerek düşürülürse, her iki grubun aktivasyon zamanında birbirine yakın değerler verdiği söylenebilir. C ve D Grubunun aktivasyon zamanı-direnç değeri dağılımını kıyaslayan grafik Şekil-4'te verilmiştir. Grafikte C Grubunun sonuçlarının dağılımı birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. D Grubunun dağılımı ise daha geniş bir alandadır. Teknik isterler açısından iki grubunda kriterleri sağladığı söylenebilir. Ancak gerek 30 μ m çaplı tellerin çok ince olması, gerek direnç değerlerinde gösterdiği sapmalar üretim pratiği açısından tasarımı zorlaştırmaktadır



Şekil 1. C ve D Grubu numunelerin Aktivasyon Zamanı – Direnç grafiği

Figure 4. Activation Time versus Strength of A and B group samples

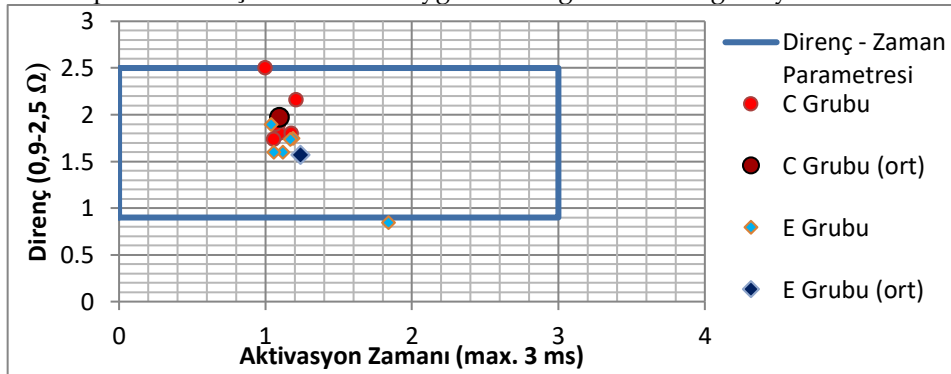
E ve F grupları arasında ise tel boyu uzunluk-direnç ilişkisine göre direnç parametresinde daha uygun ortalama sonuçlar vermiştir. Şekil-5'te E ve F Grubunun aktivasyon zamanı-direnç değeri dağılımını kıyaslayan grafik verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi direnç dağılımı daha dar bir alanda olmuştur. F Grubunun ise direnç dağılımı geniş bir alana yayılmasına rağmen, teknik isterler sınırları içinde kalmıştır. Aktivasyon zamanları ise ortalama olarak birbirlerine çok yakındır. Ancak E grubunun maksimum sonucunun dağılıma aykırı olduğu düşünülüp ihmal edildiğinde, grup ortalamasının daha düşük bir değerde çıkabileceği söylenebilir. Aktivasyon zamanı açısından tel boyunun dikkate alınır bir etkisi olmasa da direnç parametresi açısından kısa tellerin avantaj sağladığı söylenebilir



Şekil Error! No text of specified style in document.. E ve F Grubu numunelerin Aktivasyon Zamanı – Direnç grafiği

Figure 5. Activation Time versus Strength of E and F group samples

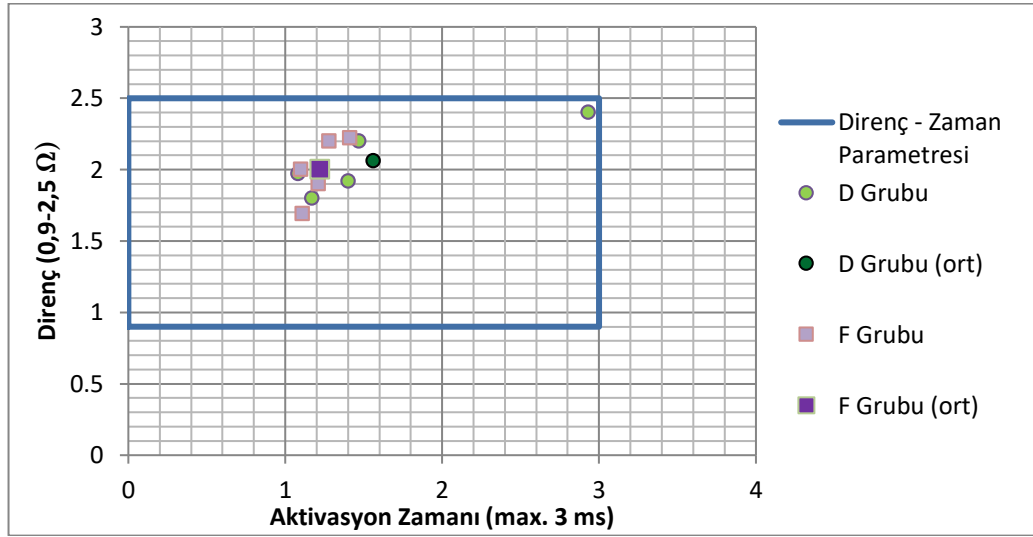
Aynı boya sahip fakat farklı çap ve bağlanma şekli incelendiğinde, ince ve paralel bağlanan kısa tellerin, kalın ve seri bağlanan kısa tellere göre daha iyi aktivasyon zamanı ve daha yüksek direnç değerleri verdikleri görülmüştür. Şekil 6'da C ve E Gruplarının aktivasyon zamanı – direnç değeri dağılımını kıyaslayan grafik ve Şekil 7'de de D ve F Gruplarının aktivasyon zamanı – direnç değeri dağılımını kıyaslayan grafik verilmiştir. Grafikler incelendiğinde C Grubunun direnç dağılımı daha genişken, aktivasyon zamanı değerlerinin dağılımı daha dar bir alanda oluşmuştur. E Grubunun ise C grubuna göre her iki parametre açısından daha uygun bir dağılımda olduğu söylenebilir.



Şekil 6. C ve E Grubu numunelerin Aktivasyon Zamanı – Direnç grafiği

Figure 6. Activation time versus Strength of C and E group samples

İnce ve paralel bağlanan uzun teller ile kalın ve seri bağlanan uzun teller incelendiğinde ise direnç değerleri arasında çok bir fark olmamakla birlikte aktivasyon zamanı açısından, F Grubunun D Grubuna göre üstün olduğu söylenebilir. Şekil-7'de D ve F Gruplarının aktivasyon zamanı – direnç değeri dağılımını kıyaslayan grafik verilmiştir. Grafik incelendiğinde direnç değerleri skalası birbirlerine yakın olmakla birlikte aktivasyon zamanı dağılımında F Grubu daha uygun bir ortalama değere ve düzgün bir dağılıma sahiptir. Ayrıca 30 µm çaplı tellerin daha ince olması ve direnç değerlerinde gösterdiği sapmalar 40 µm çaplı tellerin kullanım kolaylığı açısından daha pratik olmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. D ve F Grubu numunelerin Aktivasyon Zamanı – Direnç grafiği

Figure 7. Activation time versus Strength of D and F group samples

SONUÇLAR (RESULTS)

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde farklı özellikteki tasarımların farklı avantaj ve dezavantajlara sahip oldukları söylenebilir.

Elektriksel direnç kriteri açısından 40 µm çap-kısa-seri bağlama şeklinde tasarlanan elektrotların en uygun sonuçları verdiği görülür. Ayrıca bu grup aktivasyon zamanı olarak da teknik isterler sınırı içerisinde yer almıştır, tercih edilebilir.

Tasarımda telin puntalandığı elektrot iç çapı genişliği de telin boyunun oluşmasında etkindir. Dar iç çapta kısa kalan teller aynı tel çaplı gruplar içerisinde uzun tellere göre daha uygun direnç değerleri gösterirler.

Aktivasyon zamanı açısından ise 30 µm çap-kısa-paralel bağlama veya 40 µm çap-uzun-seri bağlama şeklinde üretilen elektrotlar daha uygun sonuçlar verir. Tel boyunun ise aktivasyon zamanı üzerinde baskın bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Tel çapının düşmesi elektriksel direnci artırır. Artan elektriksel direnç telin çift köprü olarak paralel bağlanması ile düşürülür. Ancak bu durum aktivasyon zamanının artmasına neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle 40 µm çaplı tellerin paralel bağlanması teknik isterlerin dışında sonuçlar vereceği için uygun değildir.

Aynı şekilde 30 µm çaplı tellerin de seri bağlanmaları durumunda yüksek elektrik direnci açısından uygun olmadığı görülmüştür.

Elektriksel direncin ihmal edildiği durumlarda daha düşük çaplı ve seri bağlı tellerle üretilen elektrotların daha iyi aktivasyon zamanı gösterebilecekleri anlaşılmıştır. Aktivasyon zamanının ihmal edildiği durumlarda ise, uygun elektriksel direnç değerinin daha geniş çaplı tellerle paralel bağlanarak üretilen elektrotlarda alınabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

Davis, T.L., Ekim 2018, "The Chemistry of Powder and Explosives", http://www.gunshoplosangeles.com/Pyrotechnic/Pyrotechnic_Books/Tenney_L._Davis_Chemistry_of_Powder_and_Explosives_Ocr.pdf

EMO.org.tr, Patlayıcı maddelerde kullanılan Elektrikli sistemler, patlayıcı ortamlar hakkında bilgi (http://www.emo.org.tr/ekler/d6646aad9bcc0be_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=6 Erişim tarihi Nisan 2020)

- Hazardous chemicals-Explosives<http://vumic.org/safety/waste/highly-hazardous-chemicals-explosives>
Erişim tarihi: Nisan 2020)
- Matyas, R.,Pachman, J. 2013,“Primary Explosive”, Faculty of Chemical Technology University of Pardubice, Springer Çek Cumhuriyeti.
- Meyer, R.,Köhler, J., Homburg, A. 2007,“Explosives”, Wiley-VCH & Co. KGaA, Weinheim, Almanya.
“Case Electrical Primer”Ekim 2019, <http://www.eugeneleeslover.com>.
- Yaşar, H. 1979,“Mühimmatın Esasları”, , MKE Kurumu Matbaası, Ankara
- Yıldırım, F.2013, “Büyük Kalibre Mühimmatta Kullanılan Barutların Geometrik Şekil Değişiminin Namlu İçBasıncı Ve Namlu Çıkış Hızı Üzerindeki Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi.



ÇEKME YÜKÜ UYGULANMIŞ BORU YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA BİNDİRME UÇ GEOMETRİSİNİN BAĞLANTI DAYANIMINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail SARAÇ

Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Merkez,
Aksaray, TÜRKİYE
ismailsarac@aksaray.edu.tr

(Geliş/Received: 23.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 29.05.2020)

ÖZ: Yapıştırma bağlantıları, farklı bağlantı geometrilerinde oluşturulabilmektedir. Yapıştırma bağlantı tasarımlarında yoğun bir şekilde kullanılan ve üzerinde çok sayıda araştırma yapılmış yapıştırma bağlantı şekillerinden birisi de tek tesirli bindirme bağlantılarıdır. Yapılan çalışmalar sonucunda tek tesirli bindirme bağlantılarının bindirme uçlarında oluşan gerilme yığılmalarının hasarın oluşmasında etkin rol oynadığı belirtilmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uçlarında, malzeme azaltılması yapılmasının gerilme yığılmalarını düşürdüğü ve bunun sonucu olarak bağlantı dayanımının arttığı yapılan çalışmalardan anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yapıştırılan malzemelerin bindirme uçlarında malzeme azaltılmasının, farklı bağlantı geometrilerinde dayanıma etkisinin araştırılması önemli olmaktadır. Yapılan bu çalışmada, çekme yüküne maruz bırakılmış boru yapıştırma bağlantıları modellenerek, yapıştırılan boruların bindirme bölgesindeki farklı uç geometrilerinin bağlantı mukavemetine etkisi bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak yapıştırılan boruların uç kısımlarındaki et kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi araştırılmıştır. Daha sonra, borunun bindirme bölgesi boyunca et kalınlığı, bindirme ucundan itibaren farklı uzunluklarda modellenerek boru ucu uzunluk değişiminin bağlantı dayanımına etkisi çekme yükü altında araştırılmıştır. Sonuç olarak bu çalışma şartlarında ideal tasarımın Model-4 tasarımı olduğu bulunmuştur. Bu tasarımda yapıştırma bağlantılarında kritik bölge olan yapıştırıcı tabakasının dayanımı % 20,5 oranında artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boru yapıştırma bağlantısı, hasar analizi, bindirme uç geometrisi.

The investigation of the effect of the overlap end geometry on the joint strength in pipe bonding joints with tensile load

ABSTRACT: The adhesive bonding joints can be created in different connection geometries. One of the forms of adhesive bonding joints, which has been used extensively in bonding designs and has been researched, is single lap joints (SLJs). As a conclusion of the studies carried out, it has been stated that the stress accumulation on the overlap ends of the SLJs plays an effective role in the formation of the failure. It is understood from the studies that the reduction of the material on the overlap ends decreases the stress accumulation in the SLJs, and as a result, the strength of the SLJs increased. Therefore, it is critical to examine the effect of material reduction on the overlap ends of the adhered materials on strength in different joints geometries. In this study, pipe bonding joints exposed to tensile load were modeled and the effect of different end geometries of the adhered pipes on the bond strength was investigated using ANSYS, a finite element analysis software. In the study, firstly, the effect of the wall thickness at the ends of the adhered pipes on the bond strength was investigated. The wall thickness along the overlap line of the pipe was modeled in

different lengths from the overlap end and the effect of the pipe end length change on the bond durability was examined under tensile load. Eventually, it was obtained that the ideal design in these working conditions was the Model-4 design. In this design, the strength of the adhesive layer, which is the critical region in bonding joints, has increased by 20.5%.

Keywords: Pipe bonding joint, failure analysis, overlap end geometry.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel bağlantı metotlarının yanında bir birleştirme elemanı olarak yapıştırıcıların kullanımı, özelliklerindeki gelişmelerin neticesinde giderek yaygınlaşmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirmenin diğer bağlantı yöntemlerine göre, değişik özelliklerdeki malzemeleri birleştirme, birleştirme bölgesinde düzgün gerilme dağılımı ve sistemleri daha hafif hale getirmesi gibi önemli özellikleri bulunmaktadır (Şekercioğlu, 2018).

Yapıştırma bağlantıları, özellikle enerji tasarrufunun ön plana çıktığı otomotiv ve havacılık sanayiinde geleneksel birleştirme metotlarına göre sağladığı daha hafif yapılar nedeniyle tercih edilmektedir. Bütün bu avantajlarının yanında yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen pek çok faktör bulunmaktadır. Dolayısıyla, klasik bağlantı yöntemlerine göre yapıştırma bağlantılarının dayanımının her yönden incelenmesi gerekmektedir. Yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen faktörlerden birisi bağlantı tasarımıdır. Yapıştırma bağlantılarında en çok kullanılan bağlantı tasarımı tek tesirli bindirme bağlantılarıdır. Araştırmacılar tarafından tek tesirli yapıştırma bağlantıları üzerinde yapılan çalışmalar incelendiğinde soyulma gerilmeleri bindirme uç bölgelerinde yoğunlaşarak hasar oluşumunda etkili olduğu bir çok çalışmayla gösterilmiştir. Araştırmacılar tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme uç bölgelerinde bazı tasarım değişiklikleri yaparak bağlantı dayanımını arttırmayı amaçlamışlardır.

(Solmaz, 2008), farklı bindirme mesafeleri ve uç açıları, yüksek mukavemetli ve düşük mukavemetli iki farklı dayanımdaki yapıştırıcı kullanarak ürettiği basit bindirme bağlantılarının dayanım özelliklerini çekme zorlaması altında deneylerle ve nümerik tasarımlarla araştırmıştır. Sonuç olarak, düşük mukavemetli yapıştırıcı kullanarak birleştirilen bağlantıların bindirme uç açısı değişimiyle yüksek mukavemetli yapıştırıcı kullanılan bağlantılar kadar yük taşıyabileceğini göstermiştir.

(Temiz ve diğ., 2005), film tipi yapıştırıcı kullanarak ürettikleri tek tesirli yapıştırma bağlantılarında, malzeme kalınlığı ve bindirme mesafesi değişiminin bağlantı dayanımına etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları analizler neticesinde bindirme uçlarındaki soyulma gerilmelerinin hasar oluşumunda etkin rol oynadığını göstermişlerdir.

(Akpınar, 2014), tek tesirli bindirme bağlantısı, tek basamaklı bindirme bağlantısı ve üç basamaklı bindirme bağlantısı geometrilerinde oluşturduğu yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini çekme yükü altında deneysel ve nümerik olarak incelemiştir. Araştırmacı, tek tesirli bindirme bağlantılarına göre, tek ve üç basamaklı bindirme bağlantılarında, bindirme uçlarındaki gerilme yığılmalarının azaldığını ve bunun sonucunda bağlantı dayanımlarının arttığını göstermiştir.

(Solmaz ve Turgut, 2011), yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada tek tesirli bindirme bağlantılarında bindirme mesafesi ve bindirme uç açısı değişiminin bağlantı dayanımına etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, bindirme uzunluğu artışı ve uç açısı artışının bağlantı dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir.

(Çalık, 2016), yaptığı çalışmada tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırılan malzeme bindirme uçlarındaki şekilsel değişikliklerin, bağlantı mukavemetine etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Çalışma neticesinde, yapıştırılan malzemelerde bindirme uçlarındaki şekil değişikliklerinin soyulma ve kayma gerilmelerini azaltarak bağlantı mukavemetini arttırdığını belirtmiştir.

(Pinto ve diğ., 2014), yaptıkları çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarının bindirme bölgesi uç kısımlarındaki malzeme kalınlığının azaltılması neticesinde, soyulma etkisinin azaldığını ve bunun sonucunda bağlantı dayanımının arttığını deneysel ve sayısal olarak belirtmişlerdir.

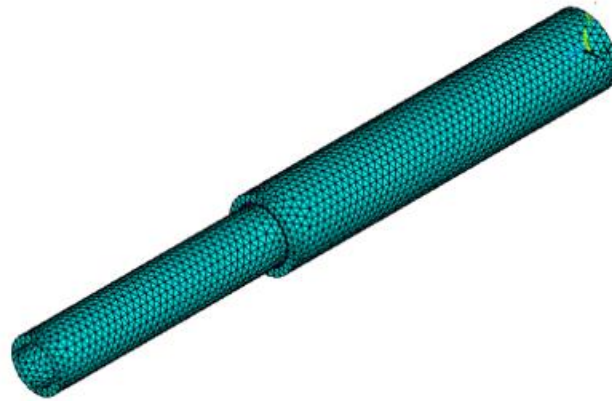
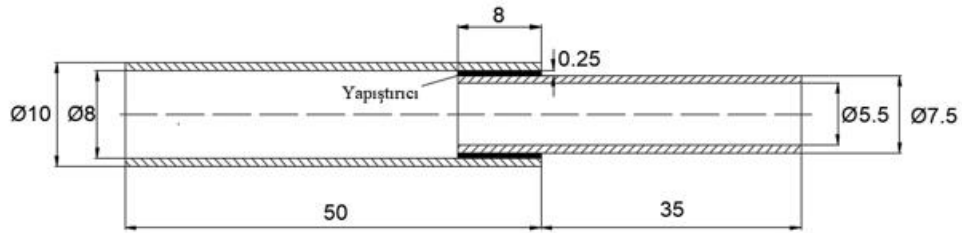
(Çalık ve Yıldırım, 2017), tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırılan malzeme uç kısımlarını girintili ve yapıştırıcı hattı uç kısımlarını dışarı doğru kavimli şekilde modelleyerek oluşturdukları bağlantı kombinasyonlarının, yapıştırıcı bölgesi uç kısımlarında oluşan soyulma gerilmelerine etkisini sayısal analizlerle incelemişlerdir. Araştırmacılar, oluşturulan yeni bağlantı kombinasyonlarının soyulma gerilmelerini azaltarak dayanımı arttırdığını belirtmişlerdir.

(Akpınar, 2019), yaptığı deneysel çalışmada, çift kirişli yapıştırma bağlantılarında, kiriş genişliği, kiriş kalınlığı ve yapıştırıcı tabaka kalınlığı faktörlerinin bağlantı performansına etkilerini Mode-I yüklemesi altında incelemiş ve oluşturduğu bağlantı tipleri için kırılma enerjisi çatlak uzunluğu grafiklerini elde etmiştir. Araştırmacı çalışma sonucunda, yapıştırılan malzeme genişliği ve kalınlığının azalmasıyla kırılma enerji değerlerinin azaldığını ve yapıştırıcı kalınlığının kırılma enerjisini önemli derecede etkilediğini belirtmiştir.

Yapılan bu çalışmada, çekme yüküne maruz bırakılmış boru yapıştırma bağlantıları modellenerek, yapıştırılan boruların farklı uç geometrilerinin bağlantı mukavemetine etkisi bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak yapıştırılan boruların uç kısımlarındaki et kalınlığının bağlantı dayanımına etkisi incelenmiştir. Daha sonra, bindirme bölgesindeki boru uçları farklı uzunluklarda modellenmiş ve boru ucu uzunluk değişiminin bağlantı dayanımına etkisi çekme yükü altında lineer gerilme ve hasar analizleri yapılarak araştırılmıştır.

MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

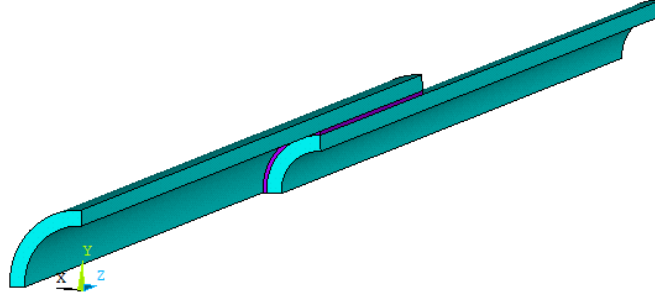
Boru yapıştırma bağlantısı referans modeli, Şekil 1'de gösterilen boyutlara uygun olarak ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak oluşturulmuştur. Boru çapları 10 ve 7,5 mm, boru et kalınlıkları 1 mm, boru uzunlukları 50 mm, bindirme bölgesi uzunluğu 15 mm, yapıştırıcı kalınlığı ise 0,25 mm olarak alınmıştır.



Şekil 1. Referans model

Figure 1. Reference model

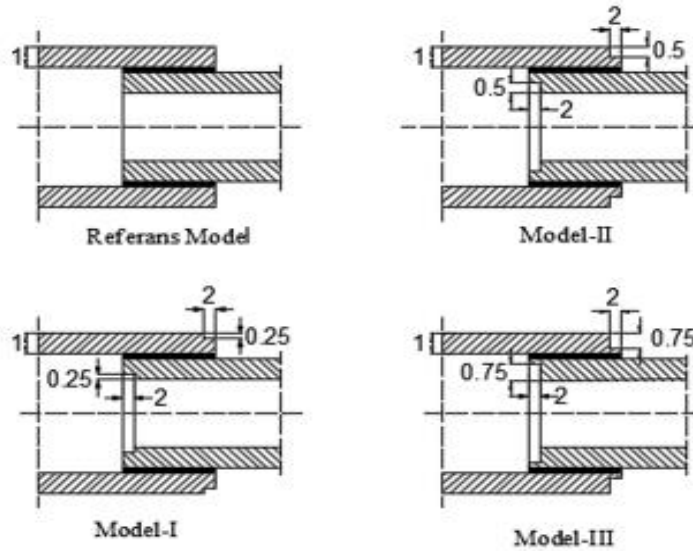
Yapıştırma bağlantı geometrisinin silindirik olmasından dolayı modelin yz ve xz düzlemlerinde simetrik olduğu bilinmektedir (Şekil 2). Bu durum göz önüne alınarak oluşturulan bütün modeller çeyrek model (1/4) olarak tasarlanmıştır. Modellerin çeyrek olarak tasarlanmasıyla eleman sayısının, düğüm noktalarının azaltılması ve bunun sonucunda ise çözümün daha kısa sürede yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 2. Çeyrek (1/4) model

Figure 2. Quarter (1/4) model

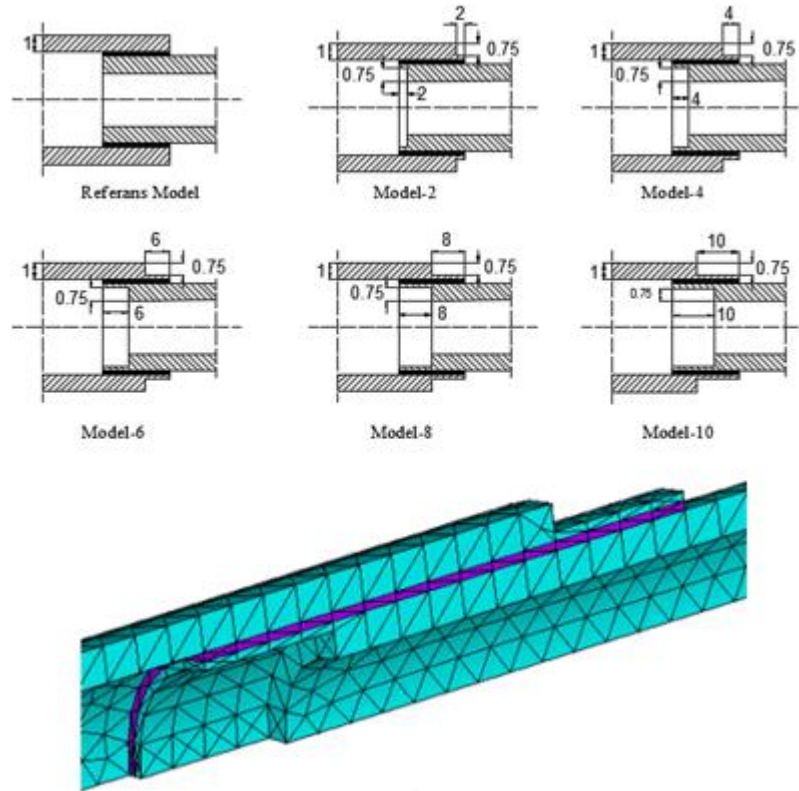
Yapılan bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak bindirme bölgelerindeki, boru ucu et kalınlığı, boru eksenine boyunca (z eksenine) 2 mm mesafede azaltılmış ve Şekil 3'te gösterilen modeller oluşturulmuştur. Referans modelde bindirme uçlarında malzeme azaltılması yapılmamıştır. Diğer modellerde, yapıştırılan iki borunun bindirme ucundan itibaren sırasıyla, 0,25, 0,50 ve 0,75 mm derinliklerde malzeme azaltılması yapılarak modeller oluşturulmuştur. Modeller arası kıyaslama yapabilmek amacıyla bindirme uzunlukları ve modellere uygulanan çekme yükleri eşit alınmıştır.



Şekil 3. Boru ucu et kalınlığı değişimine göre oluşturulan modeller

Figure 3. Models created according to pipe end wall thickness change

Çalışmanın ikinci kısmında ise, çalışmanın başlangıç kısmında belirlenen boru ucu et kalınlığı sabit alınarak bindirme bölgesi boyunca boru uçları, boru eksenı boyunca sırasıyla Şekil 4'de görüldüğü gibi farklı boylarda modellenmiştir. Referans modelde bindirme uçlarında malzeme azaltılması yapılmamıştır. Diğer modellerde, yapıştırılan iki borunun bindirme ucundan itibaren sırasıyla, 2, 4, 6, 8 ve 10 mm boylarında malzeme azaltılması yapılarak modeller oluşturulmuştur. Modeller, borulardan azaltılan malzeme uzunluğuna göre isimlendirilmiştir. Örneğin Model-2'de bindirme ucundan itibaren her iki boruda 2 mm'lik mesafede malzeme azaltılmıştır. Ayrıca modeller arası kıyaslama yapabilmek amacıyla bindirme uzunlukları ve modellere uygulanan çekme yükleri eşit alınmıştır.



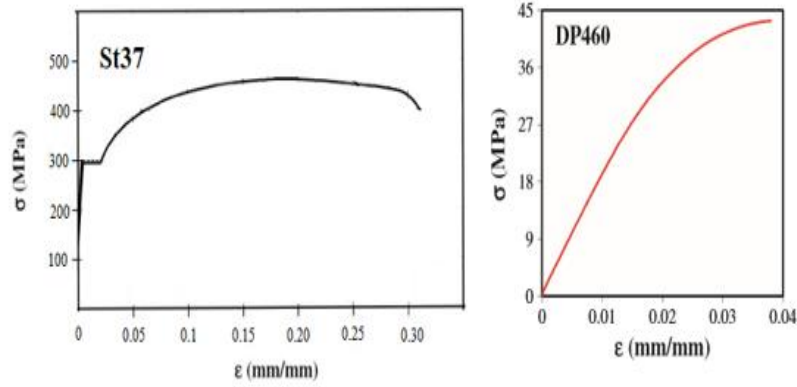
Şekil 4. Boru ucu uzunluk değişimine göre oluşturulan modeller

Figure 4. Models created according to the pipe end length change

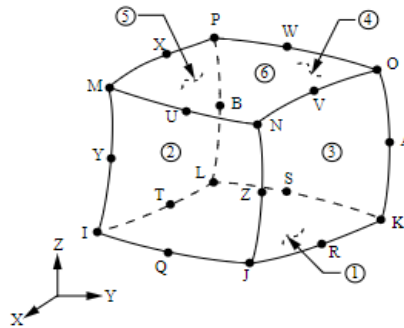
Oluşturulan bütün modellerde yapıştırıcı olarak DP460 epoksi yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme olarak ise St37 genel yapı çeliği kullanılmıştır. DP460 epoksi yapıştırıcı ve St37 genel yapı çeliğine ait Çizelge 1'de verilen mekanik özellikler programa tanımlanmıştır. Lineer olmayan sonlu elemanlar analizleri, geometrik nonlineerlik ve malzemelerin (DP460 ve St37) tek eksenli çekme testleri sonucu elde edilen ve Şekil 5'te gösterilen nonlineer davranışları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. DP460 ve St37 mekanik özellikleri (Akpınar, 2014; Malag ve Kukielka, 2007)*Table 1. DP460 and St37 mechanical properties*

Özellikler	Malzemeler	
	St37	DP460
Elastisite modülü (MPa)	200000	1984
Poisson oranı	0,3	0,38
Akma dayanımı(MPa)	235	38,4
Çekme dayanımı (MPa)	375	44,6
Tanjant modülü (MPa)	610	500

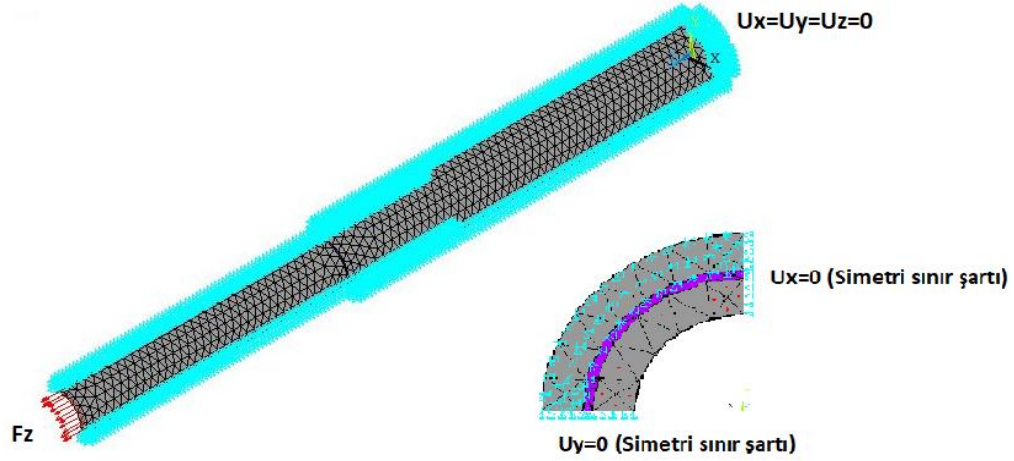
**Şekil 5.** St 37 ve DP460 σ - ϵ eğrileri (Kossakowski ve Wcislik, 2018; Özel ve diğ., 2014)*Figure 5. St 37 and DP460 σ - ϵ curves*

Oluşturulan modelleri elemanlara ayırma işlemi yapılan analizin doğruluğunu etkileyen çok önemli bir aşamadır. Eleman boyutu azaldıkça genellikle şekil değiştirme miktarları artmaktadır. Bundan dolayı şekil değiştirme miktarlarının stabil olduğu eleman boyutunun tespit edilmesi gerekmektedir. Yapılan yakınsama işlemleri sonucunda eleman boyutu bütün modellerde 3 olarak alındı. Sonlu elemanlar modellemesinde, Şekil 6'da gösterilen, 3 serbestlik dereceli ve 20 düğüm noktalı solid 186 elemanı kullanılmıştır.

**Şekil 6.** Solid 186 eleman (<https://ansyshelp.ansys.com13>)*Figure 6. Solid 186 element*

Probleme ait sınır şartları Şekil 7'de gösterildiği gibi programa tanımlanmıştır. Buna göre, çapı büyük olan boru ucu tüm yönlerde sabitlenmiştir. Bütün bağlantı modellerinde çapı küçük olan borunun uç kısmına $\sigma_z=100$ MPa basınç eksi yönde uygulanarak çekme etkisi oluşturulmuştur. Uygulanan eksi yöndeki basınç değeri uygulama alanıyla çarpılması sonucunda 2041 N değerindeki çekme yükü bulunmuştur. Modelin yz ve xz düzlemlerinde simetrik olmasından

dolayı, bu düzlemlere simetrik sınır şartları, büyük çaplı boru, küçük çaplı boru ve yapıştırıcı tabakasında ayrı ayrı olmak üzere uygulanmıştır.



Şekil 7. Boru yapıştırma bağlantısı sınır şartları
Figure 7. Pipe bonding joint boundary conditions

Yapıştırma bağlantılarının sayısal hasar yüklerini tespit etmek için Ansys programı içerisinde tanımlı olan hasar kriterleri içerisinde yer alan maksimum gerilme teorisi kullanılmıştır. Bu teoriye göre, oluşan gerilmeler lokal eksenlerde çekme, basma ve kayma gerilmesi bileşenlerine ayrılmaktadır. Bu gerilme bileşenlerinden birisi normal veya kayma mukavemetini aşarsa malzemede hasarın oluştuğu kabul edilmektedir. St37 için çeki ve bası durumları için normal gerilme mukavemet değerleri ± 235 MPa, kayma gerilmesi mukavemet değeri 117,5 MPa, DP460 epoksi yapıştırıcı için çeki ve bası durumları için normal gerilme mukavemet değerleri $\pm 38,4$ MPa, kayma gerilmesi mukavemet değeri 24 MPa olarak programa tanımlanmıştır (Aydın ve diğ., 2015).

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, Ansys sonlu elemanlar paket programı kullanılarak oluşturulan silindirik yapıştırma bağlantılarına çekme yükü uygulanarak nonlinear gerilme ve hasar analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada, hasar analizleri, yapıştırılan boru malzemelerin bindirme uçları farklı et kalınlıklarında ve uzunluklarında modellenerek kritik bölge olan yapıştırıcı tabakası ve küçük çaplı boru için yapılmıştır. Hasar analizi çalışması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yapıştırılan boru uçları farklı et kalınlıklarında modellenerek bağlantılara çekme yükü uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar referans modelle karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise birinci aşamada belirlenen boru ucu et kalınlığı sabit alınarak farklı bindirme ucu uzunluklarında modeller oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan modellere çekme yükü uygulanmış ve elde edilen sonuçlar referans modelle karşılaştırılmıştır.

Yapılan hasar analizinde maksimum gerilme hasar kriteri kullanılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen sonlu elemanlar hasar indeksleri ve hasar yükleri Çizelge 2 ve 3'te gösterilmiştir. Hasar indeksi nümerik hasar yüklerini tespit edebilmek için kullanılan basit bir sayıdır. Sonlu elemanlar hasar yükleri, yapıştırma bağlantılarına uygulanan yüklerin hasar indekslerine bölünmesiyle bulunmuştur.

Çizelge 2'de gösterildiği gibi yapıştırıcı tabakasında, referans modele göre Model-I, Model-II ve Model-III'te hasar yükü artmıştır. Yapıştırıcı tabakasındaki mukavemet artışı referans modele göre, Model-I, Model-II ve Model-III'te sırasıyla % 0,5, % 2,8 ve % 15,1 olarak gerçekleşmiştir. Boru malzemesi için, oluşturulan modellerde referans modele göre mukavemet artışı daha küçük

oranlarda gerçekleşmiştir. Bu durumda, Model-III'ün kullanılması tasarım açısından uygun olmaktadır.

Çizelge 3'te gösterilen analiz sonuçlarına göre yapıştırıcı tabakasında sayısal hasar yükü referans modele göre artmıştır. Maksimum hasar yükü artışı Model-6'da % 27,3 oranında gerçekleşmiştir. Model-8 ve Model-10'da ise mukavemet artış oranı azalmıştır. Boru malzemesi için, sayısal hasar yükü, Model-2 ve Model-4'te oldukça düşük oranlarda artarken Model-6, Model-8 ve Model-10'da keskin bir şekilde azalmıştır. Bunun sonucunda en uygun tasarım Model-4 olmaktadır. Model-4'te yapıştırıcı tabakası için hasar yükü % 20,5, boru malzemesi için ise % 2,3 oranlarında artmıştır.

Çizelge 2. Et kalınlığı farklı modellerin sonlu elemanlar hasar yükleri

Table 2. Finite element failure loads of different wall thickness models)

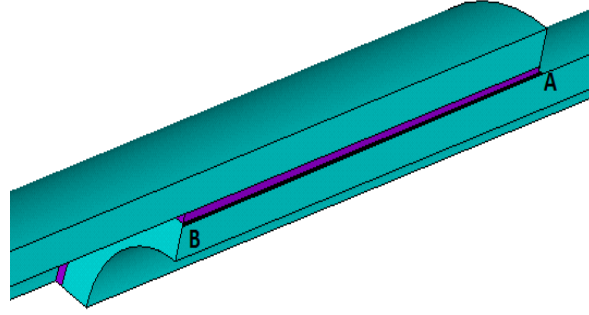
Modeller	Uygulanan yük(N)	Yapıştırıcı hasar indeksi	Yapıştırıcı sonlu elemanlar hasar yükü (N)
Referans model	2041	0,42099	4848
Model-I	2041	0,41870	4874
Model-II	2041	0,40935	4985
Model-III	2041	0,36548	5584

Çizelge 3. Bindirme ucu uzunluğu farklı modellerin sonlu elemanlar hasar yükleri

Table 3. Finite element failure loads of different models of overlap end length

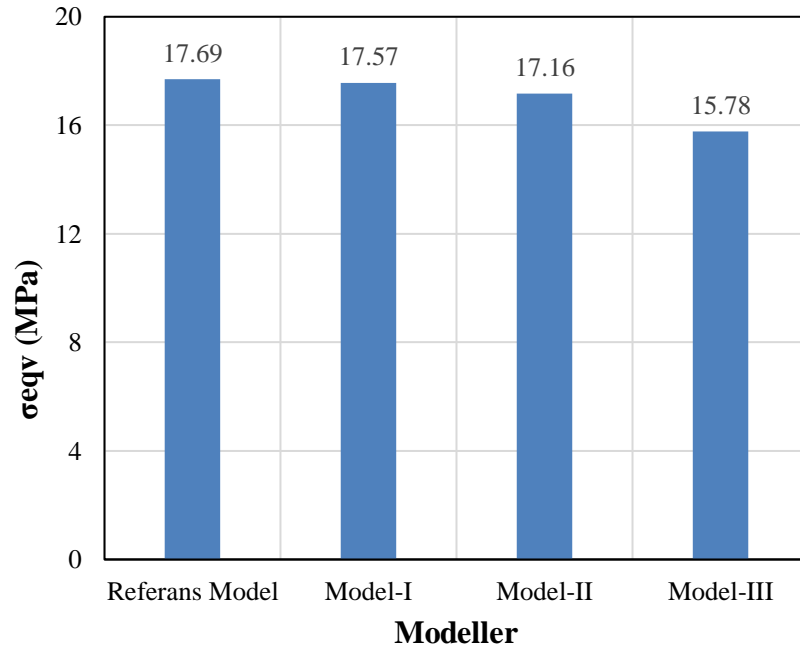
Modeller	Uygulanan yük(N)	Yapıştırıcı hasar indeksi	Yapıştırıcı sonlu elemanlar hasar yükü (N)	Boru hasar indeksi	Boru sonlu elemanlar hasar yükü (N)
Referans model	2041	0,42099	4848	0,47518	4295
Model-2	2041	0,36548	5584	0,46622	4377
Model-4	2041	0,34924	5844	0,46406	4395
Model-6	2041	0,33059	6173	0,59591	3425
Model-8	2041	0,33107	6164	0,78665	2594
Model-10	2041	0,36684	5563	1,04618	1950

Çalışmanın bundan sonraki kısmında oluşturulan modellerin yapıştırıcı tabakasındaki Şekil 8'de gösterilen hat boyunca oluşan maksimum eşdeğer gerilme değerleri karşılaştırmalı olarak Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir. Gerilme dağılımları incelenerek, oluşturulan modellerin referans modele göre hasar yükü artış veya azalma durumları Şekil 9-10'da verilen eş değer gerilme (von-Misses) grafikleri ile irdelenmiştir.



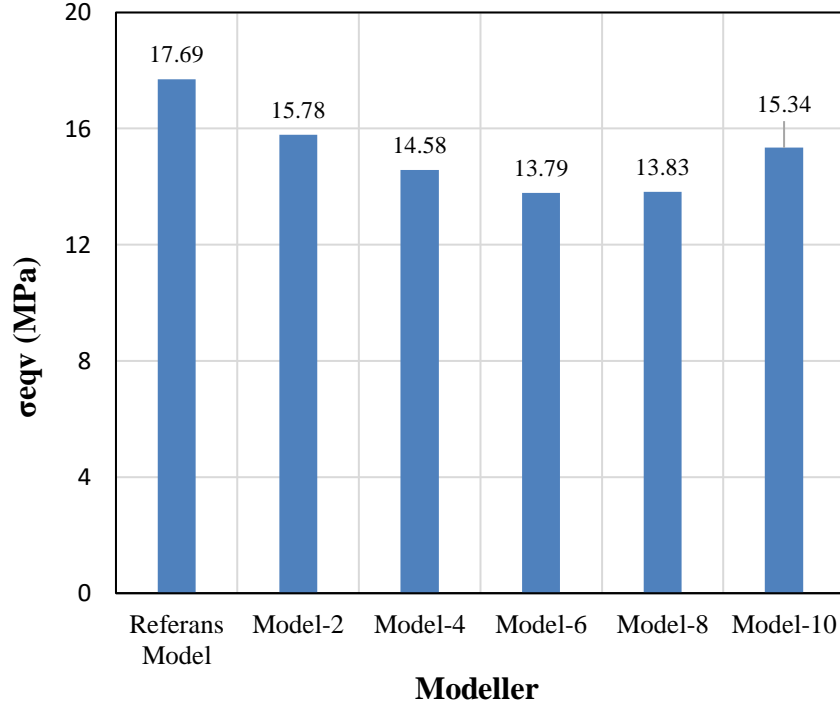
Şekil 8. Yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı

Figure 8. A-B line on the adhesive layer



Şekil 9. Et kalınlığı farklı modellerde A-B hattındaki maksimum eş değeri gerilmeler

Figure 9. Maximum equivalent stresses on the A-B line in different models of wall thickness



Şekil 10. Bindirme ucu uzunluğu farklı modellerde A-B hattındaki maksimum eş değer gerilmeler

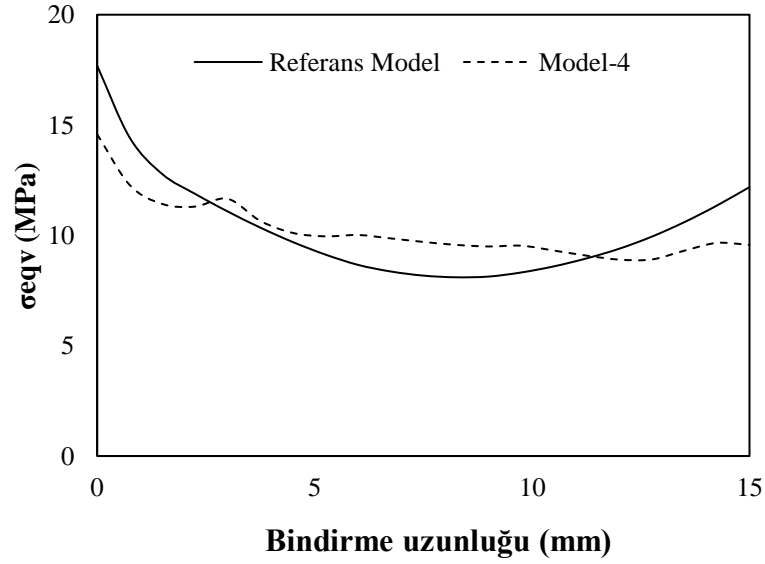
Figure 10. Maximum equivalent stresses on A-B line in different models of overlap end length

Şekil 9'da verilen grafik incelendiğinde Model-I, Model-II ve Model-III'te referans modele göre, maksimum eş değer gerilmenin azaldığı görülmektedir. Yapıştırıcı tabakası için Çizelge 2'de verilen modellerde hasar mukavemetlerindeki artışın, bindirme uç bölgelerindeki gerilme yığılmalarındaki azalmanın sonucu olduğu düşünülmektedir.

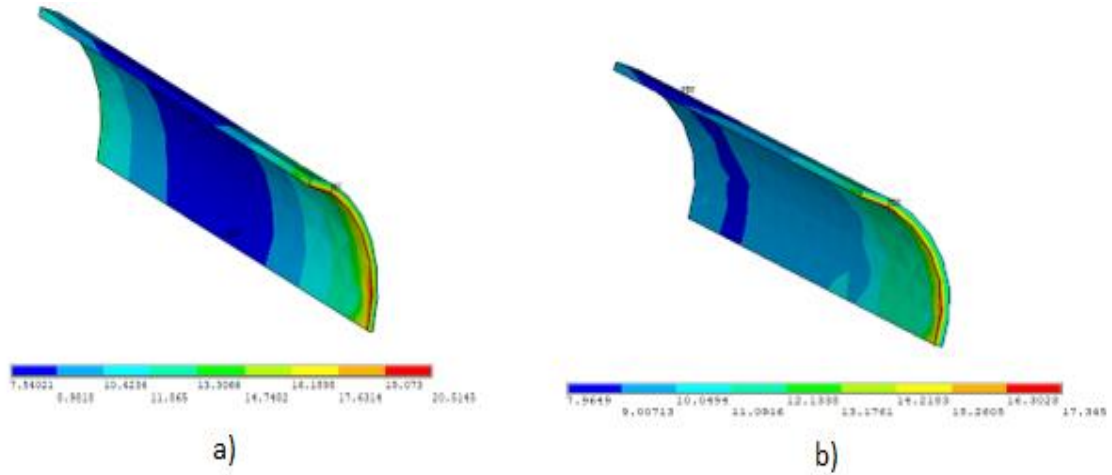
Şekil 10'da verilen grafik incelendiğinde modellerdeki eş değer gerilmeler referans modele göre azalmaktadır. Bu durum yapıştırıcı tabakası için Çizelge 3'te verilen hasar mukavemetlerindeki artışın sebebi olarak düşünülmektedir.

Şekil 11'de Referans Model ve yapılan hasar analizi sonucunda en uygun tasarım olarak önerilen Model-4'e ait bindirme bölgesindeki A-B hattındaki eşdeğer gerilme dağılımları verilmiştir. Şekil 12'de ise Referans Model ve Model-4'e ait yapıştırıcı tabakasındaki çeyrek model için genel eş değer gerilme dağılımları gösterilmiştir.

Şekil 11-12'de görüldüğü gibi maksimum eşdeğer gerilmeler bindirme uçlarında oluşmaktadır. Şekil 11'de görüldüğü gibi Model-4'te bindirme uçlarındaki eşdeğer gerilmeler azalarak, bindirme bölgesinde daha homojen bir gerilme dağılımı elde edilmiştir. Bunun sonucu olarak hasar mukavemeti artmıştır.



Şekil 11. Yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesi A-B hattındaki eş değer gerilme dağılımı
Figure 11. Equivalent stress distribution in Adhesive layer overlap zone A-B line



Şekil 12. Yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesi eş değer gerilme dağılımı, a-Referans model, b-Model-4

Figure 12. Adhesive layer overlap zone equivalent stress distribution, a-Reference model, b-Model-4

SONUÇLAR (RESULTS)

Yapılan çalışmada, boru yapıştırma bağlantılarının farklı uç geometrilerinin, bağlantı dayanımına etkisini incelemek amacıyla nonlineer gerilme ve hasar analizleri bir sonlu elemanlar analiz programı olan ANSYS kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda aşağıda verilen genel sonuçlar bulunmuştur.

Çekme yükü uygulanmış boru yapıştırma bağlantılarında maksimum gerilmeler bindirme bölgesi uç kısımlarında oluşmaktadır.

Boru ucu et kalınlığını azaltmak, bindirme uçlarındaki gerilme yığılmalarını düşürerek bağlantı dayanımının artmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada yapıştırıcı tabakası için Model-III tasarımında %15,1 oranında bir mukavemet artışı hesaplanmıştır.

Yapıştırma bölgesindeki boru uçlarından itibaren, bindirme bölgesi boyunca, boru uçlarını daha düşük et kalınlığında farklı uzunluklarda tasarlamak bağlantı dayanımını etkilemektedir.

Yapıştırıcı tabakası için referans modele göre diğer modellerde mukavemet artışı görülürken, boru malzemesi için Model-2 ve Model-4'te sınırlı da olsa mukavemet artmıştır. Ancak Model-6, Model-8 ve Model-10'da boru malzemesi için mukavemet değerleri keskin bir şekilde azalmıştır.

Bu çalışma şartlarında ideal modelin Model-4 tasarımı olduğu düşünülmektedir. Model-4'te yapıştırma bölgesi için mukavemet artışı %20,5, boru malzemesi için ise %2,3 olarak gerçekleşmiştir.

Boru malzemesi bindirme ucu tasarımında, belirli mesafeden sonra yapıştırılan boru dayanımı dikkate değer biçimde azalmaktadır. Model-6, Model-8 ve Model-10'da boru mukavemeti sırasıyla %20,2, %39,6 ve %54,5 oranlarında azalmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akpınar, S., 2014, "The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers", *Composites Part B*, Cilt 67, Sayı 1, ss. 170-178.
- Akpınar, S., 2019, "The effect of adherend thickness and width on fracture behavior in adhesively bonded double cantilever beam joints", *European Mechanical Science*, Cilt 3, Sayı 3, ss. 83-87.
- Aydın, M.D., Akpınar, S., Özel, A., Erdoğan, S., 2015, "Kayma yüküne maruz yapıştırma bağlantılarından yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi", *Mühendis ve Makine*, Cilt 56, Sayı 668, ss. 48-55.
- Çalık, A., 2016, "Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint", *Engineering Review*, Cilt 36, Sayı 1, ss. 29-34.
- Çalık, A., Yıldırım, S., 2017, "Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints with spew fillet", *Sadhana*, Cilt 42, Sayı 3, ss. 317-325.
- Kossakowski, P.G., Wcislik, W., 2018, "Numerical simulation of material damage for structural steels S235JR and S355J2G3", *Advances in Computational Design*, Cilt 3, Sayı 2, ss. 133-146.
- Malag, L., Kukielka, L., 2007, "Hybrid method to determinate the states of deformation and stress in material during the tensile test", *Proc. Appl. Math. Mech.*, Cilt 7, Sayı 1, ss. 2090025-2090026.
- Özel, A., Yazıcı, B., Akpınar, S., Aydın, M.D., Temiz, Ş., 2014, "A study on the strength of adhesively bonded joints with different adherends", *Composites Part B*, Cilt 62, Sayı 1, ss. 167-174.
- Pinto, A.M.G., Ribeiro, N.F.Q.R., Campilho, R.S.D.G., Mendes, I.R., 2014, "Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints", *The Journal of Adhesion*, Cilt 90, Sayı 8, ss. 649-666.
- Solmaz, M.Y., 2008, *Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Mekanik Analiz ve Tasarımları*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Solmaz, M.Y., Turgut, A., 2011, "An experimental and numerical study on the effects of taper angles and overlap length on the failure and stress distribution of adhesively bonded single lap joints", *Math Comput Appl*, Cilt 16, Sayı 1, ss. 159-170.
- Şekercioğlu T., 2018, *Makine Elemanları Hesap Şekillendirme*, Birsen Yayın Evi, İstanbul, Türkiye, 96-97.
- Temiz, Ş., Özel, A., Aydın, M.D., 2005, "The effect of adherend thickness on the failure of adhesively bonded single lap joints", *J Adhes Sci Technol*, Cilt 19, Sayı 8, ss. 705-718.
- <https://ansyshelp.ansys.com>, ziyaret tarihi 17 Ocak, 2020.



BİR FAZLI DGM DOĞRULTUCU İÇİN LCL FİLTRE TASARIMI VE AKTİF GÜÇ KONTROLÜ

¹Akif KARAFİL , ²Harun ÖZBAY

¹Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova, TÜRKİYE

²Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, TÜRKİYE

¹akif.karafil@yalova.edu.tr, ²hozbay@bandirma.edu.tr

(Geliş/Received: 07.01.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 05.06.2020)

ÖZ: Darbe genişlik modülasyonlu (DGM) doğrultucu devrelerinin, geleneksel diyotlu doğrultucu devrelerine göre en önemli avantajları DA geriliminin ve güç faktörünün ayarlanabilir olmasıdır. Fakat DGM doğrultucu devrelerinde sert anahtarlama durumu olduğundan dolayı şebekede yüksek dereceli akım harmonikleri oluşur. Yüksek dereceli bu akım harmoniklerinin azaltılabilmesi için şebeke tarafında bir filtre kullanılması gerekir. Birçok filtre çeşidi bulunmasına rağmen LCL tipi filtre en çok kullanılan filtre tipidir. Bu çalışmada LCL filtre hesabı yapılarak aktif güç kontrollü bir fazlı DGM doğrultucu devresine ait benzetim ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Çalışmanın benzetimi PSIM programında yapılmıştır. Sistemde tüm kontrol yazılımı için program içerisindeki C bloğuna kodlar yazılmış ve program tarafından gömülü kod üretilmiştir. Sistem 400 W aktif güç aktaracak şekilde tasarlanmış olup güç kontrolü için PI, akım kontrolü için PR denetleyici ve şebeke frekans kontrolü için T/4 gecikmeli faz kilitleme döngü (FKD) algoritması kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aktif güç kontrolü, Bir fazlı DGM doğrultucu, LCL filtre

LCL Filter Design and Active Power Control for Single Phase PWM Rectifier

ABSTRACT: The most important advantage of pulse width modulated (PWM) rectifier circuits over traditional diode rectifier circuits are the adjustable DC voltage and power factor. However, due to the hard switching condition in the PWM rectifier circuits, high order current harmonics occur in the grid. In order to reduce these high order harmonics, a filter must be used on the grid side. Although there are many filter types, the LCL type filter is the most commonly used filter type. In this study, simulation and experimental results of active power controlled single phase PWM rectifier circuit were presented by calculating LCL filter. The simulation of the study was conducted in the PSIM program. All control software of the system was achieved by writing codes to the C block in the program, and the embedded codes were produced by the program. The system was designed to transfer 400 W active power and PI was used for power control, PR controller for current control and T/4 delay phase locking loop (PLL) algorithm for grid frequency control.

Key Words: Active power control, Single phase PWM rectifier, LCL filter

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğrultucular genel olarak geleneksel ve güç faktörünü düzeltten doğrultucular olmak üzere ikiye ayrılır. Geleneksel doğrultucularda diyot ve tristör gibi anahtar elemanları kullanılarak kontrolsüz ve kontrollü doğrultma işlemi gerçekleştirilir. Bu doğrultucuların en önemli dezavantajları güç faktörünün

düşük olması ve şebeke akımının harmonik bileşenler içermesidir. Bu durum kayıpları arttırırken şebekenin aşırı yüklenmesine neden olur. Bu problemlerin giderilmesi için tek veya çift yönlü güç faktörünü düzelten doğrultucular kullanılmaktadır. Güç faktörünü düzelten doğrultucu devrelerinde MOSFET, IGBT, GTO gibi anahtar elemanları kullanılarak hem güç faktörü yükseltilir hem de şebeke akımının harmonikleri azaltılabilir. Aynı zamanda devrenin DA çıkış gerilimi de ayarlanabilmektedir (Singh ve diğ., 2003; Mansouri ve diğ., 2013).

Güç faktörünü düzelten doğrultucular arasında yer alan bir fazlı DGM doğrultucu devreleri, DA gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Song ve diğ., 2016). Uygulamalar arasında elektrikli demiryolu cer sistemi (Gou ve diğ., 2016), elektrikli araçlar (Wang ve diğ., 2019), kesintisiz güç kaynağı (Pichan ve diğ., 2017), batarya enerji depolama sistemleri (Mora ve diğ., 2019) ve rüzgâr türbinleri (Freitas ve diğ., 2016) yer almaktadır. DGM doğrultucularında, güç faktörünün ve DA geriliminin kontrol edilebilmesi önemli bir avantaj oluştururken sert anahtarlama nedeniyle oluşan anahtarlama kayıplarının ve akım harmoniklerinin artması ise bu doğrultucuların en büyük dezavantajıdır. Oluşan tek sayılı akım harmoniklerinin azaltılabilmesi için şebeke tarafında bir filtre kullanılmalıdır. Bu amaçla L, LC ve LCL filtreler kullanılarak harmonikler azaltılabilir. Fakat kullanılacak olan filtrenin harmonikleri etkili bir şekilde azaltabilmesinin yanı sıra maliyetinin ucuz, boyutunun küçük ve hafif olması istenir. Tüm bu faktörler düşünülerek LCL tipi filtre ile daha hafif ve düşük boyutlu filtre tasarımının yapılabileceği görülmektedir (Liu ve diğ., 2020; Dannehl ve diğ., 2007; Li ve diğ., 2015).

Bir fazlı DGM doğrultucu devrelerinde DA geriliminin ayarlanabilmesi ve güç faktörünün kontrol edilebilmesi için akım ve güç kontrolünün yapılması gerekir. Literatürde akım ve güç kontrolünün sağlanabilmesi için birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır (Zhang ve diğ., 2019). Bunlar; model öngörülü (Pan ve Zhang, 2017), deadbeat (Malesani ve diğ., 1999), histerezis (Zhang ve Hui, 2015), tekrarlamalı (Pandove ve diğ., 2016), bulanık mantık (Lakshmi ve diğ., 2018), oransal integral (PI) (Lin ve Yang, 2004) ve oransal rezonans (PR) (Komurcugil ve diğ., 2016) gibi kontrol yöntemleridir. Bu kontrol yöntemleri arasında PI ve PR en sık kullanılan iki yöntemdir (Bielskis ve diğ., 2020; Heredero-Peris ve diğ., 2019). Diğer kontrol yöntemleri sistemde bir zaman gecikmesi oluştururlar (Karafil ve diğ. 2018).

Bir fazlı DGM doğrultucu devrelerinde şebeke ile senkronizasyonun sağlanabilmesi için faz kilitleme döngüsünün (FKD) kullanılması gerekir. FKD algoritması ile şebeke frekansının kontrolü sağlanmaktadır. DGM doğrultma devrelerinde birçok FKD algoritması kullanılmaktadır. T/4 gecikmeli FKD algoritması faz açısının elde edilebilmesi için kullanılacak algoritmalarından biridir (Karafil ve Özbay, 2019).

Bu çalışmada, aktif güç kontrollü LCL filtreli PR akım kontrollü bir faz DGM doğrultma devresinin analizi yapılarak benzetim ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Benzetim çalışması PSIM programında yapılmış olup sistemin tüm kontrol yazılımı program içerisindeki C bloğu içerisine yazılarak devrenin kontrolünde kullanılan TMS320F28335 DSP için gömülü kod üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistemin güç kontrolünde PI, akım kontrolünde ise PR denetleyici kullanılmıştır. Şebeke frekansının kontrolünde T/4 gecikmeli FKD algoritması tercih edilmiştir. Çalışmanın bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: Giriş Bölümü'nden sonra ki kısımda LCL filtre tasarımı ve FKD yapısı anlatılmıştır. Diğer bölümde güç kontrolü ve PR akım kontrol yöntemlerinden bahsedilmiştir. Bu konulardan sonra sistemin benzetim ve deneysel sonuçlarına yer verilmiştir. Sonuç kısmında ise elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar yorumlanmıştır.

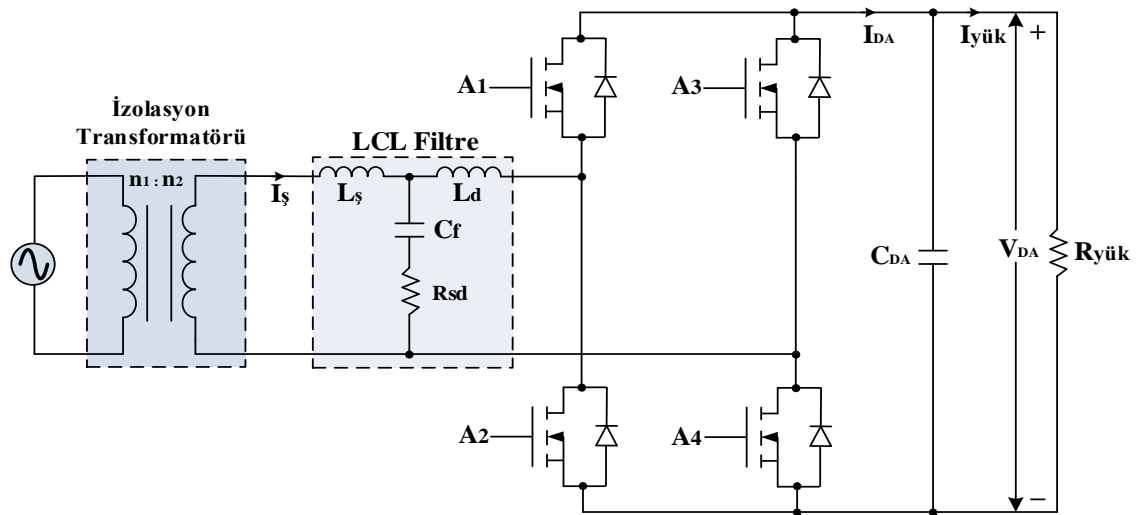
LCL FİLTRE TASARIMI VE FAZ KİLİTLEME DÖNGÜSÜNÜN YAPISI (LCL FILTER DESIGN AND STRUCTURE OF PHASE LOCKED LOOP)

Bir doğrultma devresinden beklenen şebekeden reaktif güç çekmemesi ve şebekeden çekilen akımın harmonik bileşenler içermemesidir. Şebeke akımının harmonik bileşenler içermemesi için şebeke girişinde harmoniklerin süzülmesi amacıyla filtre kullanılır. Doğrultma devrelerinde birçok filtre tipi kullanılmasına rağmen diğer filtre tiplerine göre daha hafif ve düşük boyutlu LCL tipi filtreler daha çok tercih edilmektedir. Harmoniklerin filtrelenmesinin yanı sıra doğrultma devrelerinde şebeke ile senkronizasyonun da sağlanması gerekir. Bu amaçla faz kilitleme döngüsü kullanılmalıdır. FKD

algoritması ile şebeke frekansında kilitleme işlemi gerçekleştirilerek şebeke frekansının kontrolü sağlanır (Komurcugil ve diğ., 2016; Karafil ve Özbay, 2019).

LCL Filtre Tasarımı (LCL Filter Design)

Şekil 1’de LCL filtre bağlantılı bir fazlı DGM doğrultucu devresine ait devre şeması gösterilmiştir. LCL filtre, şebeke tarafında L_s bobininden, doğrultucu tarafında L_d bobininden ve bobinler arasında paralel bağlı C_f kapasitöründen oluşmaktadır. Aynı zamanda osilasyonların engellenmesi için C_f kapasitörüne seri bağlı bir R_{sd} sönmüleme direnci de sistemde yer almaktadır. LCL tipi filtrenin kullanılması ile bobinlerin endüktans değerleri düşürülürken şebekenin akım harmonikleri de azaltılır.



Şekil 1. LCL filtre bağlantılı bir faz DGM doğrultucu devresi

Figure 1. LCL filter connected single phase PWM rectifier circuit

LCL filtre tasarımının yapılabilmesi için öncelikle devre parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Çizelge 1’de devreye ait değerler verilmiştir.

Çizelge 1. Doğrultucu devresine ait değişkenlerin değerleri

Table 1. Variable values of rectifier circuit

Değişkenler	Değerleri
Şebeke Gerilimi (V_s)	110 V
Çıkış Gücü (P_c)	400 W
DA Gerilimi (V_{DA})	220 V
Şebeke Frekansı (f)	50 Hz
Anahtarlama Frekansı (f_a)	10 kHz

Doğrultucu tarafındaki bobinin endüktans (L_d) değeri aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanır.

$$\Delta I_{L-\max} = a \cdot \frac{P_c \sqrt{2}}{V_s} \quad (1)$$

$$L_d = \frac{V_{DA}}{16 \cdot f_a \cdot \Delta I_{L-\max}} \quad (2)$$

Burada; (a) akımın dalgalanma oranıdır. Devrenin empedansı ve kapasite değerleri;

$$Z_b = \frac{V_s^2}{P_s} \quad (3)$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi f \cdot Z_b} \quad (4)$$

formülleri ile hesaplanır. Filtre kapasitörünün değeri saptanırken C_b değerinin %5'i alınır. Fakat % 5'ten de daha büyük bir değer (k) belirlenebilir.

$$C_f = k \times C_b \quad (5)$$

Şebeke kısmında yer alan bobinin endüktans (L_s) değeri saptanırken şebeke ile doğrultucu kısmındaki bobinler arasındaki ilişki katsayısından yararlanır. Bu katsayı "r" ile ifade edilir ve $0 < r \leq 1$ aralığında bir değer alır. Bu durumda L_s değeri;

$$L_s = r \cdot L_d \quad (6)$$

formülü ile hesaplanır. Filtrenin rezonans frekansında osilasyona girmemesi için filtre kapasitörüne seri bir sönümleme direnci bağlanır. Sönümleme direncinin (R_{sd}) değeri, Eşitlik (7)'deki gibi hesaplanır (Karafil, 2020).

$$R_{sd} \geq \frac{1}{3 \cdot \omega_{rez} \cdot C_f} \quad (7)$$

Burada; (ω_{rez}) rezonans frekansının açısal hızıdır. Rezonans frekansı (f_{rez}) ve rezonans frekansının açısal hızı sırasıyla aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$f_{rez} = \frac{\sqrt{\frac{L_d + L_s}{L_d L_s C_f}}}{2\pi} \quad (8)$$

$$\omega_{rez} = \sqrt{\frac{L_d + L_s}{L_d L_s C_f}} \quad (9)$$

Rezonans frekansı, anahtarlama frekansından düşüktür. Çünkü LCL filtrenin anahtarlama frekansı içerisinde filtreleme görevini yerine getirebilmesi gerekir. Bu yüzden rezonans frekansı, Eşitlik (10)'daki gösterildiği aralıklarda yer almalıdır (Sun ve diğ., 2009).

$$10f \leq f_{rez} \leq \frac{1}{2} f_a \quad (10)$$

Denklemler yardımıyla $L_d=3,24$ mH, $C_f=7,892$ μ F, $L_s=0,972$ mH, $R_{sd}=4,7$ Ω ve $f_{rez}=2071,88$ Hz olarak hesap edilmiştir.

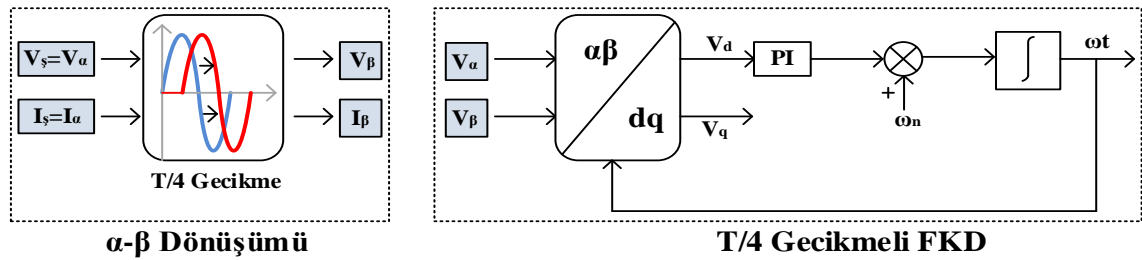
Faz Kilitleme Döngüsünün Yapısı (Structure of Phase Locked Loop)

Şebeke frekansının kontrolü FKD algoritması ile gerçekleştirilir. Temel olarak FKD yapısı bir faz detektörü, bir döngü filtresi ve bir gerilim kontrollü osilatörden oluşmaktadır. Bir fazlı uygulamalarda

birçok FKD algoritması kullanılır. Bu algoritmalar arasındaki temel fark faz detektörünün düzenlenmesi ve faz hatasının belirlenmesinde sinüzoidal çarpanın uyarlanmasıdır. Bir fazlı sistemlerde kullanılan FKD algoritmaları genel olarak dörde ayrılır. Bunlar; T/4 gecikmeli FKD, ters Park dönüşüm tabanlı FKD, gelişmiş FKD ve ikinci dereceden genelleştirilmiş integratör tabanlı FKD algoritmalarıdır. Bir fazlı uygulamalarda faz açısının elde edilmesinde kullanılan en basit algoritmalarından biri T/4 gecikmeli FKD algoritmasıdır (Ciobotaru ve diğ., 2006; Yang ve Blaabjerg, 2012). Bu çalışmada T/4 gecikmeli FKD algoritması kullanılmıştır. T/4 gecikmeli FKD algoritmasında α - β ve d-q eksen takımlarına ihtiyaç vardır. Ortogonal sanal sinyalin (β bileşeni) elde edilebilmesi için α bileşeni $\pi/2$ kaydırılması gerekir. Bu durumda iki bileşen elde edilir. Bunlardan; α bileşeni reel, β bileşeni ise sanal eksendedir. T/4 gecikmeli FKD devresinde α - β 'nin Park Dönüşümü ile d-q eksen takımına dönüştürülmesi için Eşitlik (11)'den yararlanılmıştır (Yang ve Blaabjerg, 2012).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

Şekil 2'de T/4 gecikmeli FKD yapısı gösterilmiştir.

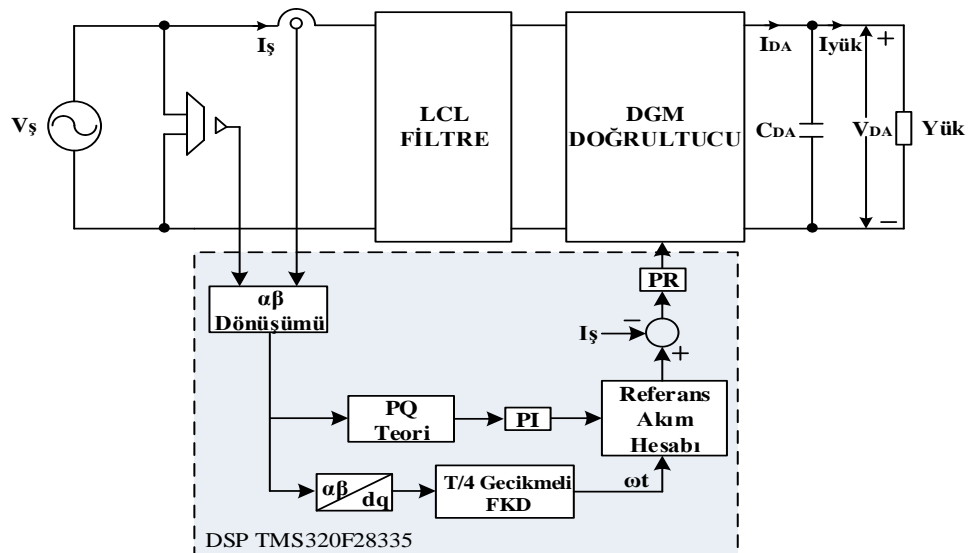


Şekil 2. T/4 gecikmeli FKD yapısı

Figure 2. T/4 delay PLL structure

BİR FAZLI DGM DOĞRULTUCUNUN KONTROLÜ (CONTROL OF SINGLE PHASE PWM RECTIFIER)

Sistemin kontrol blok şeması Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Bir fazlı DGM doğrultma devresinin kontrol blok şeması

Figure 3. Control block scheme of single phase PWM rectifier circuit

Aşağıdaki formüller yardımıyla aktif ve reaktif güç (PQ Teori) hesabı yapılmıştır.

$$P = \frac{1}{2}(V_{\alpha} \cdot I_{\alpha} + V_{\beta} \cdot I_{\beta}) \quad (12)$$

$$Q = -\frac{1}{2}(V_{\alpha} \cdot I_{\beta} + V_{\beta} \cdot I_{\alpha}) \quad (13)$$

Elde edilen güç hata değerleri PI denetleyicisinden geçirilmiş ve FKD algoritmasından elde edilen ωt formüllere dâhil edilerek referans akım hesabı yapılmıştır. Referans akım formülü aşağıdaki eşitlikler kullanılarak bulunmuştur (Karafil ve diğ., 2020).

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{ref}}{P_{ref}} \right) \quad (14)$$

$$I_s = \frac{P_{ref}}{V_q \cos \theta} \quad (15)$$

$$i_{ref} = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t - \theta) \quad (16)$$

Elde edilen referans akımı, I_s (I_{α}) akım değerinden çıkartılarak hata akımı elde edilmiştir. Hata akımı, PR akım denetleyicisinden geçirilerek anahtar sinyalleri oluşturulmuştur. PR denetleyici şebekeye bağlı bir veya üç fazlı sistemlerde kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir. PI ve PR, birbirlerine benzeyen ve birçok ortak noktası olan denetleyicilerdir. İki denetleyici arasındaki en önemli fark integrasyonun gerçekleşme biçimidir. PR denetleyicide integral sadece rezonans frekansına yakın frekans değerlerinde işlem yapar. Ayrıca PR denetleyici, PI denetleyicinin bilinen iki önemli dezavantajını ortadan kaldırır. Birincisi sinüzoidal referanslı sıfır kararlı durum hatasıyla takip edilmesi diğeri ise parazitlerin engellenmesidir (Athari ve diğ., 2017; Zhang ve diğ., 2014). Şebekeye bağlı sistemlerin kontrolünde sıfır kararlı durum hatası elde etmek amacıyla genellikle PR denetleyici tercih edilir. PR denetleyicinin uygulanmasında bazı problemler yer alır. İdeal PR denetleyicide sınırsız kazanç harmonik bileşenleri artır. Harmonik bileşenlerinin azaltılması için kullanılan ideal olmayan PR denetleyicinin formülü Eşitlik (17)'de verilmiştir.

$$G_{npr}(s) = K_p + \frac{2K_i \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (17)$$

Burada, ω_n şebekenin açılmal frekansı, K_p ve K_i değerleri ise sırasıyla oransal ve integral kazanç değerleridir. ω_c ise kesim açılmal frekansdır. İdeal olmayan PR denetleyici de daha düşük kazanç ve bant aralığı mevcuttur (Karafil ve Özbay, 2019; Teodorescu ve diğ., 2006).

Sistemde kullanılan PI ve PR denetleyicilerin parametre değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. PI ve PR denetleyicilerin parametre değerleri

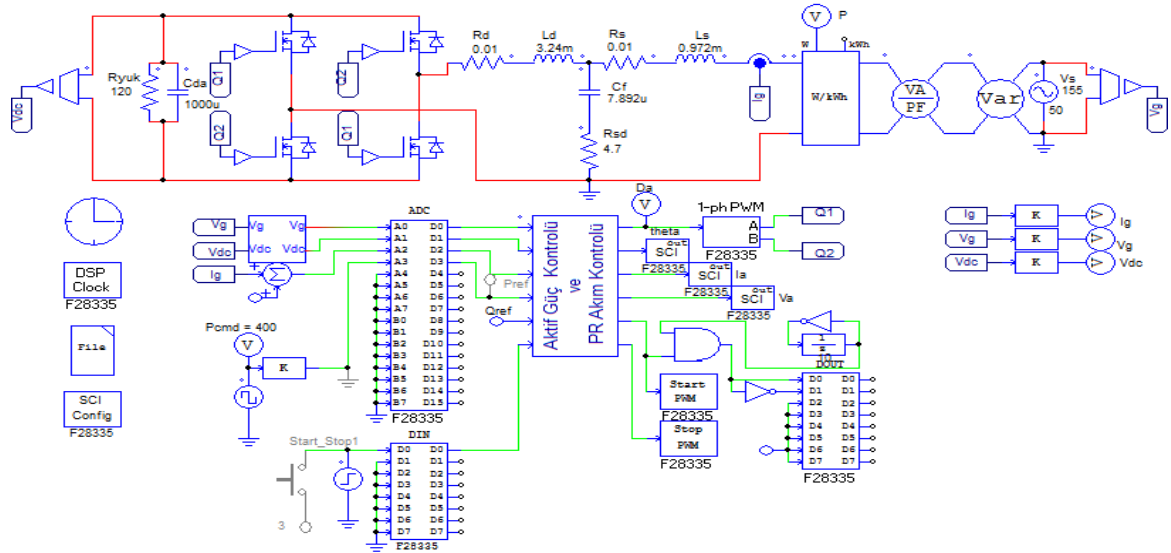
Table 2. Parameter values of PI and PR controllers

Parametreler	Değerleri
FKD algoritmasındaki PI denetleyici için oransal (K_p)	1000
FKD algoritmasındaki PI denetleyici için integral (K_i)	5
Güç kontrolündeki PI denetleyici için oransal (K_p)	5
Güç kontrolündeki PI denetleyici için integral (K_i)	250
Akım kontrolündeki PR denetleyici için oransal (K_p)	2,5
Akım kontrolündeki PR denetleyici için integral (K_i)	400

Doğrusal denetleyiciler olan PI ve PR denetleyicilerin parametre değerleri Ziegler-nichols, kazanç-faz marjın yöntemleri kullanılarak bulunmaktadır. Ayrıca optimizasyon algoritmaları kullanılarak da parametre değerleri belirlenebilir (Dos Santos Coelho, 2009). Sistemde kullanılan PI ve PR denetleyicilerin parametre değerleri kazanç-faz marjın yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

BENZETİM VE DENEYSSEL SONUÇLARI (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

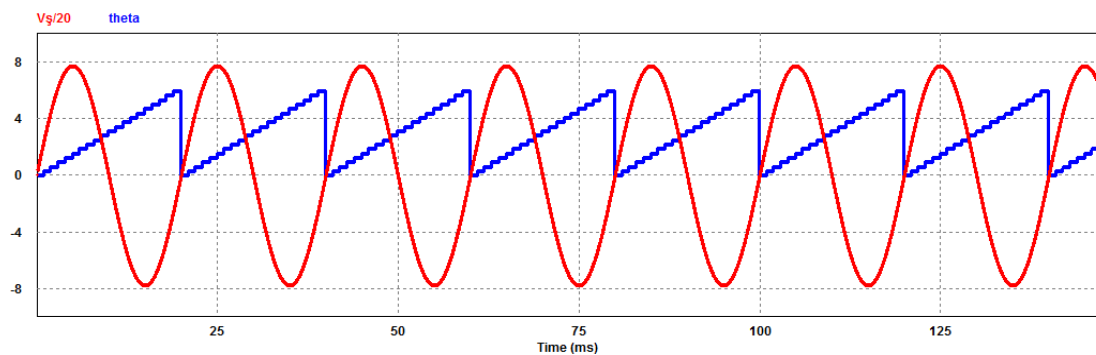
Bir fazlı DGM doğrultma devresinin PSIM programındaki benzetim ekran görüntüsü Şekil 4'te verilmiştir. DGM doğrultma devresinde yük direnci 120 Ω , DA kapasitör değeri 1000 μF olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Bir fazlı DGM doğrultma devresinin benzetimi

Figure 4. Simulation of single phase PWM rectifier circuit

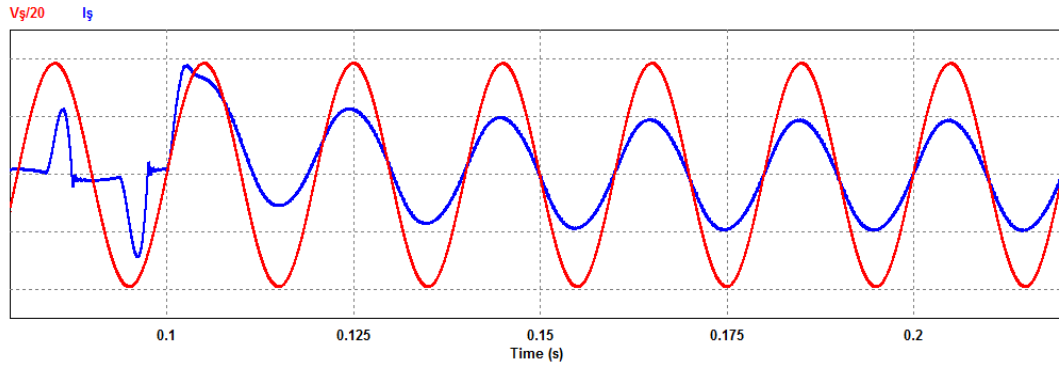
FKD algoritması ile şebeke gerilimi algılanıp sıfır geçiş anları yakalanarak her periyot için şebeke ile senkronize olan açılma hızı değerleri üretilmektedir. Şebeke gerilimi ve senkronize olarak üretilen açılma hızı değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Şebeke gerilimi ve üretilen açılma hızı değerleri

Figure 5. Grid voltage and generated angular speed values

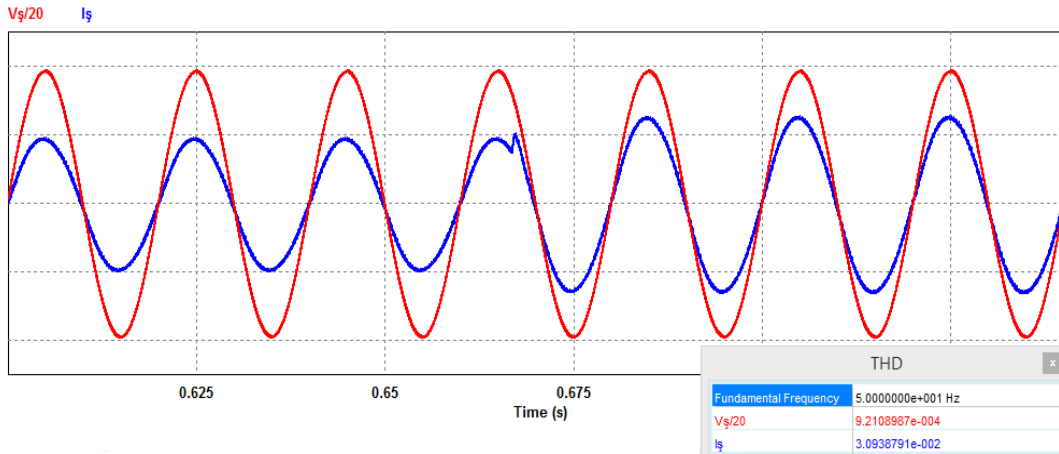
Sistemin aktif gücü $P=300\text{ W}$, reaktif gücü $Q=0\text{ VAR}$ iken şebekenin akım ve gerilim dalga şekilleri, Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. 300 W aktif güçteki şebekenin akım ve gerilim değerleri

Figure 6. The current and voltage values of the grid at 300 W active power

Sistemin 300 W güçten 400 W güce geçiş anındaki şebeke akım ve gerilim dalga şekilleri, Şekil 7'de verilmiştir.

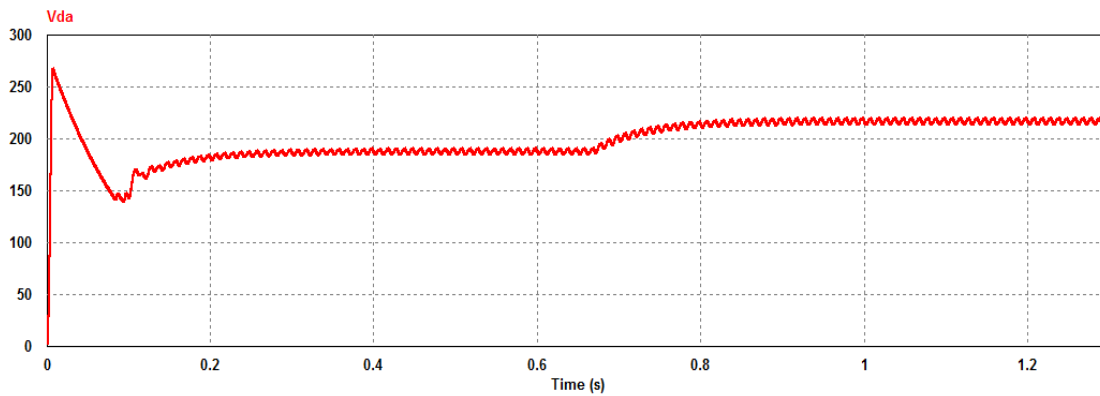


Şekil 7. 300 W güçten 400 W güce geçiş anındaki şebekenin akım ve gerilim değerleri

Figure 7. The current and voltage values of the grid at 300 W active power

Şekil 7'den de görüleceği üzere güç geçişleri osilasyonsuz olup şebeke akımının THD değeri de %3,09 olarak bulunmuştur. Bu durum denetleyicinin dinamik yapısının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

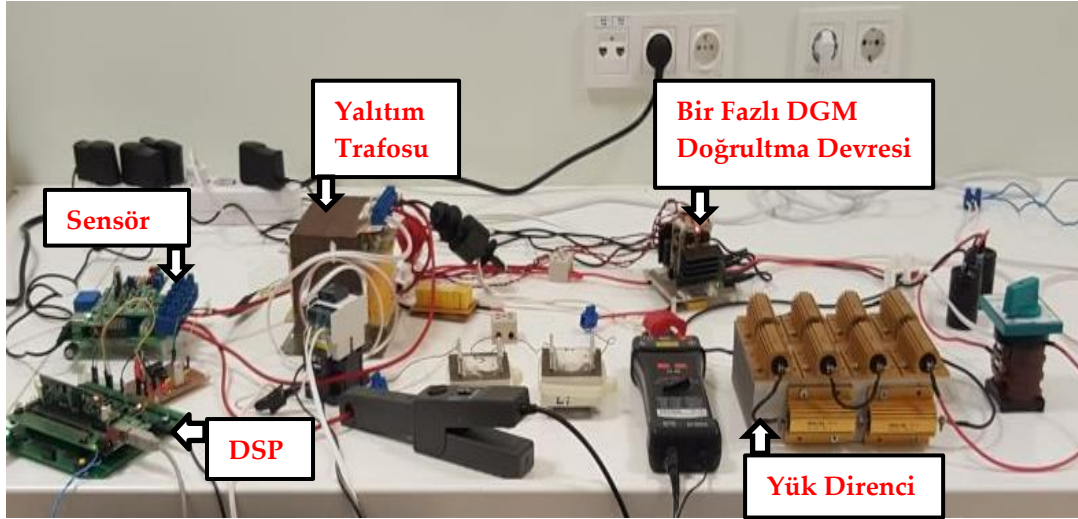
Sistemde 300-400 W aktif güç değerlerinde yük uçlarında oluşan DA gerilim değişimi Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Yük uçlarındaki DA gerilim değişimi

Figure 8. DC voltage change on load terminals

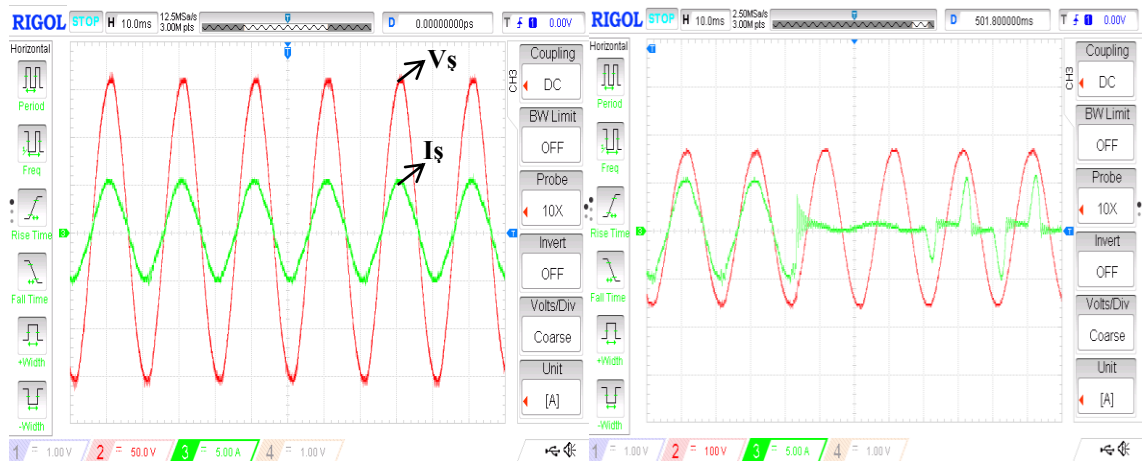
400 W aktif güç değerinde bir fazlı DGM doğrultucu prototip devresi tasarlanmış ve Şekil 9’da tasarlanan devrenin deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 9. Bir fazlı DGM doğrultucu devrenin prototipi

Figure 9. The prototype of single phase PWM rectifier circuit

Devre için gerekli olan 110 V'luk şebeke gerilimi yalıtım trafosu kullanılarak sağlanmıştır. Doğrultma devresinde dört adet IRFP460N MOSFET güç anahtarları yer almaktadır. Bir fazlı şebeke akımının ve geriliminin ölçülebilmesi için ACS756SCA-050B ve LV25-P hall etkili sensörler kullanılmıştır. Devrenin kontrolü için bir adet TMS320F28335 sayısal sinyal işlemcisi (DSP) kullanılmıştır. 400 W aktif güç değerinde test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Devrede reaktif güç kontrolü yapılmadığından Q değeri sıfır olarak alınmıştır. Şekil 10’da şebekeden çekilen akım ve gerilim dalga şekillerinin osiloskop görüntüleri verilmiştir.

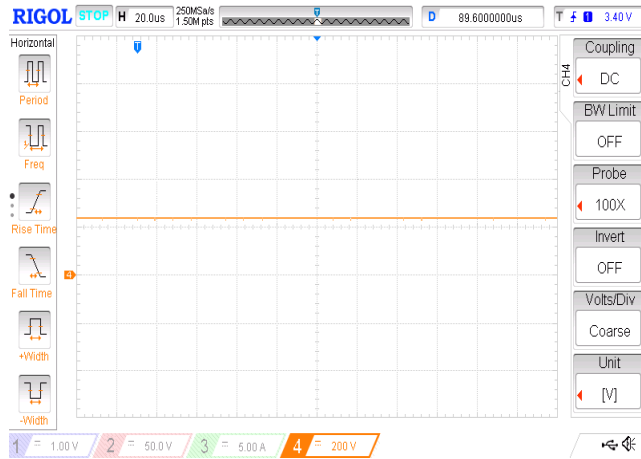


Şekil 10. 400 W aktif güç değerinde şebekenin akım ve gerilim değerleri

Figure 10. The current and voltage values of the grid at 400 W active power

Osiloskopta kırmızı renkteki görüntü şebeke gerilimini (V_s), yeşil renk ise şebeke akımını (I_s) göstermektedir. Şekil 10’dan da görüleceği üzere aktif güç çekildiğinde akım ile gerilim arasında herhangi bir faz farkı yoktur.

Bir fazlı DGM doğrultucu çıkışındaki 120 Ω yük direnci üzerindeki DA gerilim değişimi Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11. Bir fazlı DGM doğrultucu devrenin çıkış gerilimi

Figure 11. Output voltage of single phase PWM rectifier circuit

Bir fazlı DGM doğrultucunun aktif güç kontrolü hem benzetim hem de deneysel sonuçlar ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada akım kontrolü için PR denetleyici, FKD algoritması için ise T/4 gecikmeli FKD algoritması kullanılmıştır.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Yapılan bu çalışmada LCL filtreli bir faz DGM doğrultma devresinin aktif güç kontrolünün benzetim ve deneysel sonuçları elde edilmiştir. Güç kontrolü için PI, akım kontrolü için PR denetleyici ve şebeke frekans kontrolü için ise T/4 gecikmeli FKD algoritması kullanılmıştır. Algoritma yazılımları, PSIM programı içerisindeki basitleştirilmiş C bloğunun içerisine yazılmıştır. Sistemde önce LCL filtre hesabı yapılarak tasarım gerçekleştirilmiş daha sonra sistem 400 W aktif güç değerinde test edilmiştir. Tasarım sonucuna uygun olarak yük uçlarındaki DA gerilim değeri 220 V ölçülmüştür. Devrenin kontrolü için TMS320F28335 DSP kullanılmıştır. Çalışmada reaktif güç kontrolü yapılmamıştır. İlerleyen çalışmalarda reaktif güç kontrolü de yapılarak aktif-reaktif güç kontrollü DGM doğrultucu devresine ait deneysel sonuçlar sunulacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)





- Athari, H., Niroomand, M., Ataei, M., 2017, "Review and Classification of Control Systems in Grid-Tied Inverters", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72, pp. 1167-1176.
- Bielskis, E., Baskys, A., Valiulis, G., 2020, "Controller for the Grid-Connected Microinverter Output Current Tracking", *Symmetry*, Vol. 12, No. 1, pp. 112.
- Ciobotaru, M., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., "A New Single-Phase PLL Structure Based on Second Order Generalized Integrator", *In 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, South Korea, 1-6, 18-22 June 2006.
- Dannehl, J., Fuchs, F. W., Hansen, S., "PWM Rectifier with LCL-Filter Using Different Current Control Structures", *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 1-10, 2-5 Sept. 2007.
- De Freitas, T. R., Menegáz, P. J., Simonetti, D. S., 2016, "Rectifier Topologies for Permanent Magnet Synchronous Generator on Wind Energy Conversion Systems: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 1334-1344.
- Dos Santos Coelho, L., 2009, "Tuning of PID Controller for An Automatic Regulator Voltage System Using Chaotic Optimization Approach", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 39, No. 4, pp. 1504-1514.
- Gou, B., Ge, X., Wang, S., Feng, X., Kuo, J. B., Habetler, T. G., 2016, "An Open-Switch Fault Diagnosis Method for Single-Phase PWM Rectifier Using a Model-Based Approach in High-Speed

- Railway Electrical Traction Drive System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 5, pp. 3816-3826.
- Herederer-Peris, D., Chillón-Antón, C., Sánchez-Sánchez, E., Montesinos-Miracle, D., 2019, "Fractional Proportional-Resonant Current Controllers for Voltage Source Converters", *Electric Power Systems Research*, Vol. 168, pp. 20-45.
- Karafil, A., Özbay, H., Öncü, S., "Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarımı İçin LCL Filtre Analizi", *Int. Conf. on Data Sci. and Appl. (ICONDATA)*, Yalova, Türkiye, 554-558, 4-7 Oct. 2018.
- Karafil, A., Özbay, H., 2019, "Power Control of Single Phase Active Rectifier", *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 332-336.
- Karafil, A., Özbay, H., Öncü, S., 2020, "Design and Analysis of Single Phase Grid Tied Inverter with PDM MPPT Controlled Converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 35, No. 5, 4756-4766.
- Karafil, A., 2020, "Pasif Seri Sönümlenme Direncinin LCL Filtreli Bir Fazlı Şebeke Etkileşimli Evirici Üzerine Etkisi", *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, <http://doi:10.5505/pajes.2020.99896>.
- Komurcugil, H., Altin, N., Ozdemir, S., Sefa, I., 2016, "Lyapunov-Function and Proportional-Resonant-Based Control Strategy for Single-Phase Grid-Connected VSI with LCL Filter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 5, pp. 2838-2849.
- Lakshmi, M. B., Thangasankaran, R., Gnanavadivel, J., Christa, S. J., "Performance Evaluation of Fuzzy Controlled Single Phase PWM Rectifier", *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 1974-1979, 29-31 March 2018.
- Li, S., Fu, X., Ramezani, M., Sun, Y., Won, H., 2015, "A Novel Direct-Current Vector Control Technique for Single-Phase Inverter with L, LC and LCL Filters", *Electric Power Systems Research*, Vol. 125, pp. 235-244.
- Lin, B. R., Yang, T. Y., 2004, "Single-Phase Half-Bridge Rectifier with Power Factor Correction", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol. 151, No. 4, pp. 443-450.
- Liu, Y., Xu, J., Shuai, Z., Li, Y., Cui, G., Hu, S., Xie, B., 2020, "Passivity-Based Decoupling Control Strategy of Single-Phase LCL-Type VSRs for Harmonics Suppression in Railway Power Systems", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 117, 105698.
- Malesani, L., Mattavelli, P., Buso, S., 1999, "Robust Dead-Beat Current Control for PWM Rectifiers and Active Filters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 3, pp. 613-620.
- Mansouri, M., Kaboli, S. H. A., Selvaraj, J., Rahim, N. A., "A Review of Single Phase Power Factor Correction AC-DC Converters. In *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, Lankgawi, Malaysia, 389-394, 18-20 Nov. 2013.
- Mora, D., Núñez, C., Visairo, N., Segundo, J., Camargo, E., 2019, "Control for Three-Phase LCL-Filter PWM Rectifier with BESS-Oriented Application", *Energies*, Vol. 12, No. 21, 4093.
- Pan, L., Zhang, C., 2017, "Model Predictive Control of a Single-Phase PWM Rectifier for Electric Vehicle Charger", *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 4027-4033.
- Pandove, G., Trivedi, A., Singh, M., 2016, "Repetitive Control-Based Single-Phase Bidirectional Rectifier with Enhanced Performance", *IET Power Electronics*, Vol. 9, No. 5, pp. 1029-1036.
- Pichan, M., Ahmad, A. A., Abrishamifar, A., Fazeli, M., "Simple and Efficient Design and Control of the Single Phase PWM Rectifier for UPS Applications", *2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC)*, Mashhad, Iran, 383-388, 14-16 Feb. 2017.
- Singh, B., Singh, B. N., Chandra, A., Al-Haddad, K., Pandey, A., Kothari, D. P., 2003, "A Review of Single-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 5, pp. 962-981.
- Song, W., Deng, Z., Wang, S., Feng, X., 2016, "A Simple Model Predictive Power Control Strategy for Single-Phase PWM Converters with Modulation Function Optimization", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 7, pp. 5279-5289.

- Sun, W., Chen, Z., Wu, X., "Intelligent Optimize Design of LCL Filter for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier", *In 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Wuhan, China, 970-974, 17-20 May 2009.
- Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Liserre, M., Loh, P. C., 2006, "Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol. 153, No. 5, pp. 750-762.
- Wang, P., Bi, Y., Gao, F., Song, T., Zhang, Y., 2019, "An Improved Deadbeat Control Method for Single-Phase PWM Rectifiers in Charging System for EVs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 10, pp. 9672-9681.
- Yang, Y., Blaabjerg, F., "Synchronization in Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems under Grid Faults", *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Aalborg, Denmark, 476-482, 25-28 June 2012.
- Zhang, N., Tang, H., Yao, C., 2014, "A Systematic Method for Designing A PR Controller and Active Damping of the LCL Filter for Single-Phase Grid-Connected PV Inverters", *Energies*, Vol. 7, No. 6, pp. 3934-3954.
- Zhang, C., Yu, S., Ge, X., 2019, "A Stationary-Frame Current Vector Control Strategy for Single-Phase PWM Rectifier", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, No. 3, pp. 2640-2651.
- Zhigang, G., Hui, F., "Hysteresis Control with Constant Switching Frequency of Single-Phase PWM Rectifier", *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, 559-563, 25-28 Oct. 2015.



YÜK BARASI ÖLÇÜMLERİNE DAYALI GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

¹Talha Enes GÜMÜŞ , ²Selim MERİÇ , ³Mustafa TURAN , ⁴Mehmet Ali YALÇIN 

^{1,3,4}Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, TÜRKİYE

²Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezi, Sakarya, TÜRKİYE

¹tgumus@sakarya.edu.tr, ²smeric@sakarya.edu.tr, ³turan@sakarya.edu.tr, ⁴yalcin@sakarya.edu.tr

(Geliş/Received: 01.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.06.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, gerilim kararlılığı açısından bir yük barasındaki kritik değerlerin belirlenmesi için, ilgili baraya ait gerilim (V), yük akımı (I) ve güç açısı (φ) yerel ölçümlerini kullanarak kestirim yapan iki farklı yaklaşım irdelenmiştir. İlk olarak, yerel bara ölçümlerinden güç sisteminin Thevenin eşdeğer devre parametreleri kestirilmiş, ardından gerilim kararlılığının değerlendirilmesi için gerekli kritik gerilim ve gerilim kararlılık marjini değerleri hesaplanmıştır. Sunulan yaklaşım IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde denenmiştir. IEEE 30 baralı standart test sisteminde MATPOWER yazılımı ile güç akışı yapılarak incelenecek baralara ait veriler elde edilmiş ve her iki yöntem ile gerilim kararlılığı değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, iki yaklaşımda yük baralarındaki gerilim kararlılık sınırlarını başarı ile belirlediği ve baraların gerilim kararlılığı açısından yüklenme düzeylerinin değerlendirilmesinde, kritik baraların tespitinde ve yük atma işlemlerinin önceliklenmesinde kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Gerilim kararlılığı, Thevenin eşdeğeri, Gerilim kararlılığı marjini.

Voltage Stability Assessment by Using Local Bus Parameters

ABSTRACT: In this study, in order to determine critical values of a load bus with respect to voltage stability, two different estimation approaches using local measurements of voltage (V), current (I) and phase angle (φ) on the relevant bus are investigated. First, Thevenin equivalent circuit parameters of the power system is estimated from local bus measurements; then, the critical voltage and voltage stability margin values required for evaluation of the voltage stability are calculated. The proposed approach has been tested on the IEEE 30 bus test system. In IEEE 30 standard test system, the data of the buses to be analyzed was acquired by setting up a power flow with MATPOWER software. The simulation results show that both approaches have successfully determined the voltage stability limits on the load buses and they can be used to evaluate the loading levels of the buses in terms of voltage stability, to determine the critical buses and to prioritize the load shedding operations.

Key Words: Voltage stability, Thevenin equivalent, Voltage stability margin.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi günümüzün en esnek ve en yaygın kullanılan enerji türüdür. Enerji iletim sistemleri tipik olarak; üretim, iletim, dağıtım ve tüketim dizgeleri olarak ele alınmaktadır. Günümüzde elektrik şebekeleri çok sayıda ülkeyi de içine alan büyük ölçeklerde enterkonnekte sistemlere dönüşmüş durumdadır. Günümüz alternatif akım şebekelerinde önemli büyüklükler gerilim ve frekans olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan bakıldığında bu büyük sistem anlık olarak güç arz talebini

sağlamalı, çeşitli arıza veya bozucu etkilere karşı gerilim ve frekans gibi önemli büyüklükleri kararlı bir şekilde sürdürebilmelidir. Böyle bir sistemin kaçınılmaz olarak kayıpları da vardır. Dolayısı ile beklenti hem kararlı ve hem de ekonomik işletimdir.

Güç sisteminin, olabildiğince verimli ve kabul edilebilir bir çalışma noktasında işletilmesi ve bir bozucuya maruz kaldığında işletme gerilimini istenilen aralıkta tutabilmesi için gerilim kararlılığı değerlendirmelerinin yapılması gerekir.

Bir güç sistemini; diferansiyel, ayrık veya cebirsel olarak modellemek mümkündür. Böyle bir yaklaşım ile kısa veya uzun dönemli analizler yapılabilir. Dinamik etki yapan tüm aktörlerin etkileri izlenebilir [1]. Fakat çok baralı lineer olmayan gerçek bir sisteminin modellenmesi ve doğru verilerin sürdürülmesi çok zaman alıcı olup dinamik benzetimlerle hızlı sonuç alınamamaktadır. Bunun yerine biraz daha sadeleştirilmiş yarı sürekli hal denilebilecek bir yaklaşım ile denklem sayısı azaltılabilir [1,2]. Bu az sayıdaki denklem ile benzetimler yapılarak sistem kararlılığı araştırılabilir.

Gerilim kararlılığı incelemesinde kullanılan en yaygın araç yük akışı analizidir. Bu analizlerde genellikle klasik Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır [3,4]. Bu hesaplamalarda Jacobian matrisinin tekil olduğu nokta gerilim kararlılık sınırındır. Yük akışı ile sistemin ilgilenilen barası için P-V ve Q-V eğrileri çizilerek sistemin yüklenme sınırları bulunur. Bu inceleme yaklaşımı sistemlerin planlama ve yeniden yapılandırılması için daha uygun olmaktadır. Diğer taraftan tekillik noktası civarında Newton-Raphson tabanlı yaklaşımların yakınsama zorluğu bulunduğu da bilinmektedir [5,6].

Gerilim kararlılığı incelemesinde kullanılan bir diğer yaklaşım ise "L" indisi diye tanımlanan göstergelerin kullanılmasıdır [7]. Bu indisler hat veya bara yüklenme indisleri olarak da isim almakta olup, pek çok farklı türleri geliştirilmiştir. "L" indisi değerinin 0 olması sistemin yüksüz durumda olduğunu; 1 olması ise hat veya baranın gerilim kararsızlığı oluşturacak şekilde yüklendiğini işaret etmektedir. Bu indisler yük atma içinde kullanılmaktadır [8].

Gerilim kararlılığının değerlendirilmesinde güç sistemin Thevenin eşdeğer empedansına dayalı indisler de oluşturulmuştur [9,10,11]. Bu yaklaşım güç sisteminin maksimum güç transferi noktasının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu çalışmalarda sorun Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesidir. [10]'da en küçük kareler tekniğini içeren bir yaklaşım ve [11,12,13]'de ters matris çözümüne dayalı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmalarda gerilim kararlılığı sınırlarının belirlenmesi için VSM (Voltage Stability Margine) diye ifade edilen farklı gerilim kararlılık marjini tanımlanmıştır. [14]'de farklı L ve VSM göstergeleri ve olası kullanım alanları tartışılmıştır. Son yıllarda yapay zeka tabanlı teknikler kullanılarak VSM hesaplamaları yapılmaktadır[15,16].

Son zamanlarda, fazör ölçüm birimlerin (PMU) geliştirilmesi ile beraber yeni yaklaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. PMU'ların kullanımı ile geniş alan görüntüleme ve kontrolü mümkün olabilecektir. Fakat PMU'lardan sağlanacak gerilim-akım fazör ölçümlerinin mikro saniyeler hassasiyetinde senkronize olması beklenmektedir. Güç sisteminin pek çok barasından senkronize toplanan verilerin bulut bilişim sistemlerinde büyük veri olarak depolanması ve çok hızlı değerlendirilmesi yeni sorunları beraberinde getirmekte olup, bu konuda pek çok çalışma yürütülmektedir. Bu veriler ile anlık gerilim kararlılığı ve diğer değerlendirmelerin yapılması mümkün olabilecektir [17,18,19,20,21,22].

Bu çalışmada öncelikle, gerçek zamanlı gerilim kararlılığı değerlendirmesine yönelik olarak n-baralı bir güç sisteminin incelenen baradan görünen Thevenin Eşdeğerine indirgenmesi yapılacaktır. Bu amaçla, n-baralı güç sisteminin k. yük barasından yapılan gerilim (V), yük akımı (I) ve güç açısı (φ) ölçümlerinden hareketle, k. baradan görülen sistemin Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin gerçek zamanlı kestirimine yönelik uygulanan iki farklı yöntem sunularak, elde edilen parametrelerden gerilim kararlılığı değerlendirmesinin nasıl yapılacağı gösterilecek ve elde edilen yaklaşımlar ile IEEE 30 baralı standart test sisteminde yapılan benzetim sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

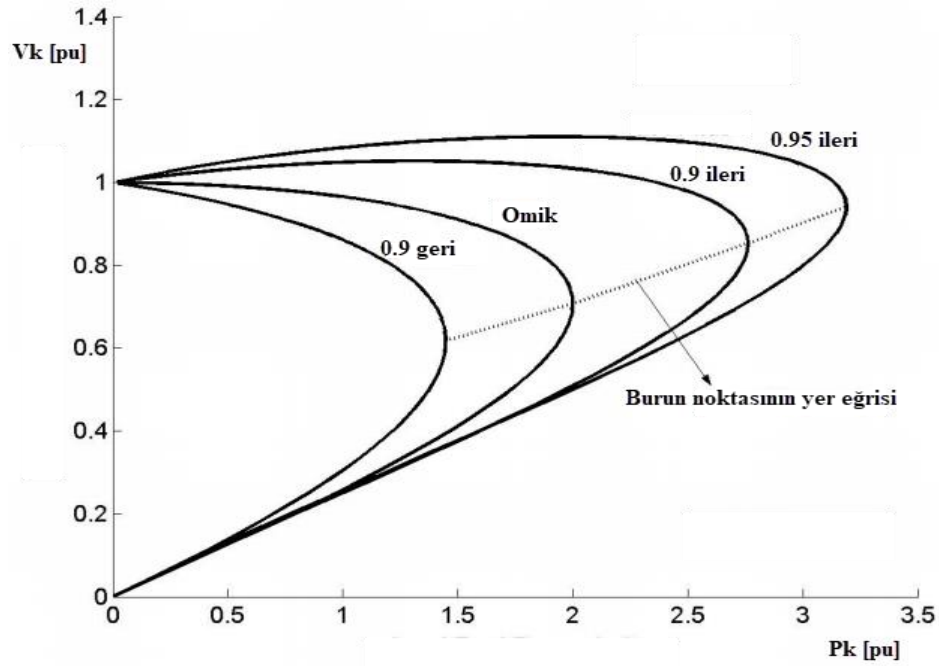
GERİLİM KARARLILIĞI PROBLEMİ (VOLTAGE STABILITY PROBLEM)

IEEE/CIGRE [23] ortak çalışması, gerilim kararlılığını; bir güç sisteminin belirli bir çalışma noktasında bir bozucuya maruz kalması sonrasında tüm baralarda gerilimi kabul edilen aralıklarda tutabilme

yeteneği ve gerilim çökmesini; kabul edilemez aşırı gerilim düşümü, kesintiler veya tüm sistemin devre dışı kalmasına sebep olan olayların oluşturmuş olduğu karmaşık bir süreç olarak tanımlamaktadır.

Güç sistemlerinde kararsızlığın sebebi her zaman çok belirgin olmayabilir. Farklı sebepler ile başlayan ve birbirini tetikleyen karmaşık süreçler açı kararsızlığı, frekans kararsızlığı veya gerilim kararsızlığı ile sonlanabilir [13]. Konuya oluş mekanizması veya çözüm önerileri açısından bakıldığında konu daha iyi anlaşılabilir. Gerilim kararsızlığı; reaktif güç üretim (arz) sorunları, hat taşıma kapasitesindeki değişimler (paralel hatların açması), seri kompanzasyon sistemlerindeki sorunlar, şönt kompanzasyon sistemlerindeki yetersizlikler, doğrusal olmayan yüklerin davranışları, yük altında kademe değiştirebilen transformatörlerin etkileri, otomatik gerilim regülatörlerinin etkileri, şebeke arızaları sonucunda oluşan aşırı reaktif güç talepleri – düşen transfer kapasitesi gibi etki mekanizmalarının bir veya birkaçının oluşması ile tetiklenebilir. Etki mekanizması reaktif güç tedariki ve gerilim düşümü kaynaklı olduğu için, bu iki unsurun iyi planlanması ve izlenilip önlem alınması ile süreç durdurulabilir. Önlem, hızlı reaktif güç tedariki veya kritik baralardan yük atmak şeklinde alınabilir.

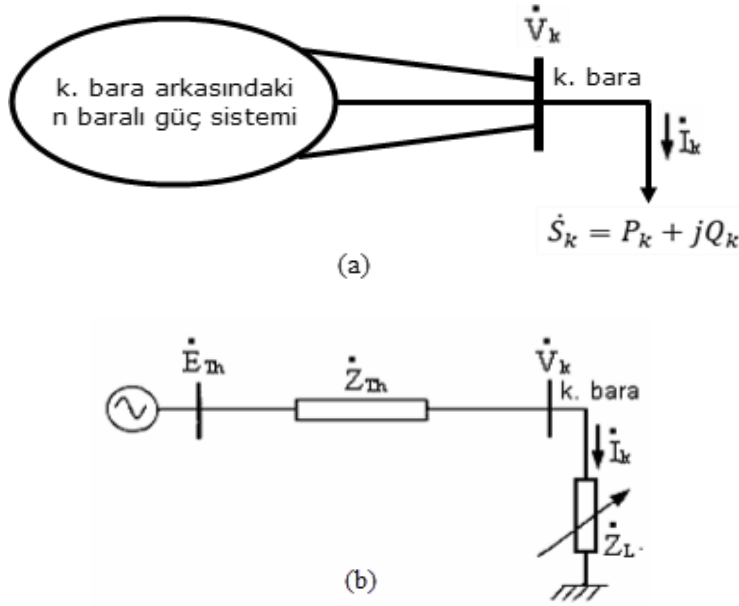
Klasik olarak bir sistem üzerinde gerilim kararlılığı, yük akışı yapılp PV veya QV eğrilerinin burun noktaları araştırılarak değerlendirilir (Şekil 1). Fakat bu yaklaşım tüm sistem parametrelerinin bilinmesini gerektirdiğinden, gerçek zamanlı değerlendirmeler için uygun değildir.



Şekil 1. k. yük barasında farklı güç faktörlü yüklenmeler için çizilmiş tipik bir P-V eğrisi.

Figure 1. A typical P-V curve plotted for different power factor loads at the k. load bus.

THEVENİN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİ KESTİRİM YÖNTEMİ (ESTIMATION METHOD OF THEVENIN'S EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS)



Şekil 2. (a) k. bara arkasında kalan güç sistemi, (b) Thevenin Eşdeğeri ve yük
Figure 2. (a) The power system behind k^{th} bus. (b) Thevenin Equivalent and load.

Şekil 2'de n-baralı bir sistemin k. yük barasından bakıldığında görünen Thevenin eşdeğerini temsil etmektedir. V_k referans alınarak bu devre için Kirchoff çevre eşitliği;

$$E_{Th} \cdot e^{j\delta} = V_k + I_k \cdot e^{j\varphi_k} \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (1)$$

yazılabilir. Bu eşitlik gerçel eksen α , ve imajiner eksen β olmak üzere iki eşitlik takımı düzenlenerek yazılırsa;

$$E_{Th} \cdot e^{j\delta} = V_k + I_k \cdot e^{j\varphi_k} \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (2)$$

$$E_{\beta} - I_k \cdot R_{Th} \cdot \sin(\varphi_k) - I_k \cdot X_{Th} \cdot \cos(\varphi_k) = 0 \quad (3)$$

yazılabilir. Bu iki eşitlik E_{α} , E_{β} , R_{Th} ve X_{Th} 'dan oluşan dört bilinmeyeni (Thevenin eşdeğer parametreleri) çözümlenmek için yeterli değildir. Bunun için k. baradan ardıl en az iki ölçüm alınmalıdır [11]. Bu ölçümler k. baradan ardıl olarak sürekli alınacaktır. İlk ölçüm 1, ikinci ölçüm 2 indisi ile gösterilmek üzere;

$$\begin{bmatrix} -I_1 \cos(\varphi_1) & I_1 \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_2 \cos(\varphi_2) & I_2 \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_1 \sin(\varphi_1) & -I_1 \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_2 \sin(\varphi_2) & -I_2 \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_{\alpha} \\ E_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} -I_1 \cos(\varphi_1) & I_1 \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_2 \cos(\varphi_2) & I_2 \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_1 \sin(\varphi_1) & -I_1 \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_2 \sin(\varphi_2) & -I_2 \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Tanımlanarak, ters matris yöntemi ile bilinmeyen vektörü çözülebilir:

$$A \cdot x = b \quad ; \quad x = A^{-1} \cdot b \quad (6a,b)$$

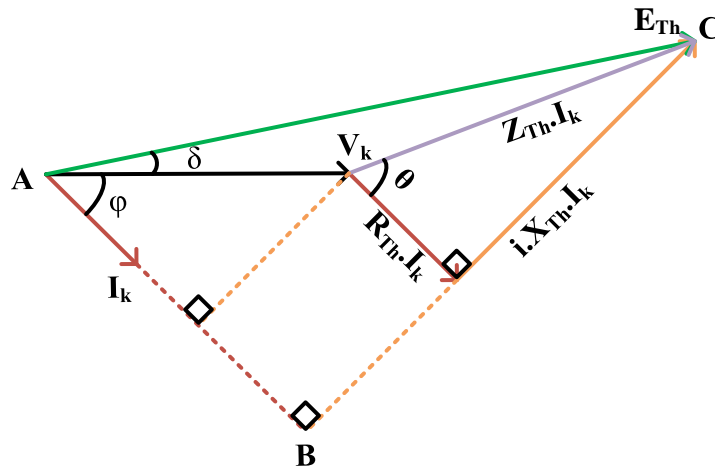
Literatür ile karşılaştırıldığında, elde edilen bu çözüm, Haque'nin [11] çözümünün sadeleştirilmiş haline denk gelmektedir (Yöntem 1). Bu sadeleştirme, ters matris işleminde oluşan tekillik sorununda iyileşme sağlamaktadır. 6b eşitliğinin çözümünden, sistemin Thevenin eşdeğer geriliminin etkin değeri, yük açısı, eşdeğer empedans ve empedans açısı;

$$E_{Th} = \sqrt{E_\alpha^2 + E_\beta^2} \quad ; \quad \delta = \text{atan} \left(\frac{E_\alpha}{E_\beta} \right) \quad (7a,b)$$

$$Z_{Th} = \sqrt{R_{Th}^2 + X_{Th}^2} \quad ; \quad \theta = \text{atan} \left(\frac{X_{Th}}{R_{Th}} \right) \quad (8a,b)$$

elde edilir. V referans seçildiğinden, 7b ifadesinde bulunan yük açısı, k. baraya (yüke) doğru olan beslemelerde pozitif çıkacaktır.

Yapılan çeşitli benzetimlerde, 7a ifadesinin Thevenin gerilimini %1'den küçük hatalar ile kestirdiği görülmüştür. Matris çözümünden (Denklem 5) elde edilen E_{Th} ile Z_{Th} için yan çözümler geliştirilmiştir [13] (Yöntem 2). Bir tek E_{Th} 'nin bile yüksek doğrulukta bulunması, sürece büyük katkı yapmaktadır. Zira Z_{Th} için yan çözümler geliştirilebilmektedir.



Şekil 3. Eşitlik 1 için çizilmiş fazör diyagramı

Figure 3. Phasor diagram drawn for equation 1

Kestirimler yapılırken, temel kabullerden ilki k. baradan yapılan ölçüm çiftleri esnasında E_{Th} 'in sabit kaldığıdır. Fazör diyagram üzerinde tanımlanan ABC üçgeni için;

$$E_{Th}^2 = (V_k \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_k \cdot \sin(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2 \quad (9)$$

ile verilen Pisagor bağıntısı yazılabilir. Bu aşamada Z_{Th} ve θ haricindeki tüm parametreler bilinmektedir. Orta gerilim ve yüksek gerilim hatları için θ açısı 70-85 derece aralığında çıkmaktadır [13]. Bu durum, bu çalışmada yapılan benzetim çalışmaları sürecinde de gözlenmiştir. Ayrıca çeşitli yük ve işletme şartlarında Z_{Th} ve θ 'nın çok az değiştiği gözlenmiştir. Çalışmanın devamında θ sabit ve ortalama 80 derece alınacaktır. θ ; Z_{Th}' 'in hesaplanmasına çok ciddi etki yapmamaktadır. Zira bu çalışmada sadece Z_{Th}' 'in genliği ile ilgilenilmekte ve yapılacak gerilim kararlılığı değerlendirmesi için R_{Th} ve X_{Th}' 'in ayrı ayrı bulunması gerekmemektedir. Yapılan benzetimlerde θ 'daki 10 derecelik bir hatanın empedansta maksimum %4 hata getirdiği, devamında yapılan hesaplamalarda hatanın artmadığı gözlenmiştir. 9 Nolu eşitlikten Z_{Th}' 'nin kökleri çözülüp, pozitif yanıt üreten kök alınır;

$$Z_{Th} = \frac{\sqrt{4 \cdot E_{Th}^2 - 2 \cdot V_k^2 + 2 \cdot V_k^2 \cdot \cos(2\varphi_k - 2\theta) - 2 \cdot V_k \cdot \cos(\varphi_k - \theta)}}{2 \cdot I_k} \quad (10)$$

bulunur. Yine Şekil 3'ten δ açısı hesaplanırsa;

$$\delta = \arccos\left(\frac{E_{Th}^2 - I_k^2 \cdot Z_{Th}^2 + V_k^2}{2 \cdot E_{Th} \cdot V_k}\right) \quad (11)$$

olarak bulunur. Böylece, 7a ve 10 numaralı eşitlikler ile n baralı güç sisteminin Thevenin eşdeğer parametreleri, k. baradan yapılan V, I ve φ ölçümleri kullanılarak kestirilmiş olur.

Bir sistemin Thevenin eşdeğer devresinin bilinmesi, yaygın bilinen maksimum güç transferi ilkelerinin uygulanması ile, o sistemden transfer edilebilecek maksimum güç sınırı hakkında kesin bilgi sağlar.

GERİLİM KARARLILIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF VOLTAGE STABILITY)

Güç sistemlerinde kararlılık değerlendirmesi yapılacak barada gerilim kararlılığı sınırlarının değerlendirilebilmesi için, ilgili baradan çekilebilecek maksimum gücün bilinmesi gerekir. Yaygın olarak bilinen maksimum güç teoremine göre, Şekil 2b'deki sistemin yüke transfer edebileceği maksimum gücün, her bir faz için;

$$|Z_{Yük}| = |Z_{Th}| \quad (12)$$

Yük empedansının, güç sisteminin ilgili barasından bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer devre empedansına eşit olması durumunda gerçekleşir. Bu durum gerilim kararlılığı açısından k. bara için sınır (kritik) değerdir. Buradan hareketle, kritik durumda;

$$|Z_{Yük}| \cdot I_k = |Z_{Th}| \cdot I_k \quad (13)$$

olacaktır. Maksimum güç transferi için çevre denklemleri yazılırsa;

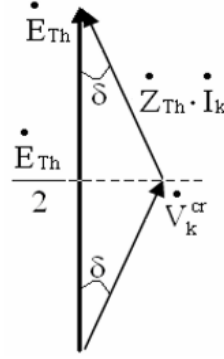
$$\dot{E}_{Th} = \dot{Z}_{Th} \cdot \dot{I}_{Yük} + \dot{Z}_{Yük} \cdot \dot{I}_{Yük} \quad (14)$$

$$\dot{E}_{Th} = \dot{I}_{Yük} \cdot (2 \cdot \dot{Z}_{Th}) \quad (15)$$

denklemleri elde edilir. Sistemden maksimum güç transfer edildiğinden ilgili baradan çekilen akım kritik akım olacaktır.

$$\dot{I}_{Kritik} = \frac{\dot{E}_{Th}}{2 \cdot \dot{Z}_{Th}} \quad (16)$$

İlgili baradan kritik akım çekildiği esnada (maksimum güç transferi) baraya ait fazör diyagramı Şekil 4’de verildiği gibi olacaktır.



Şekil 4. Kritik durumda gerilim fazörleri

Figure 4. Voltage phasors in critical condition

Şekil 4’den gerilim kararlılığı değerlendirme yapılacak bara için kritik gerilim değeri ve gerilim kararlılık marjini (VSM_V);

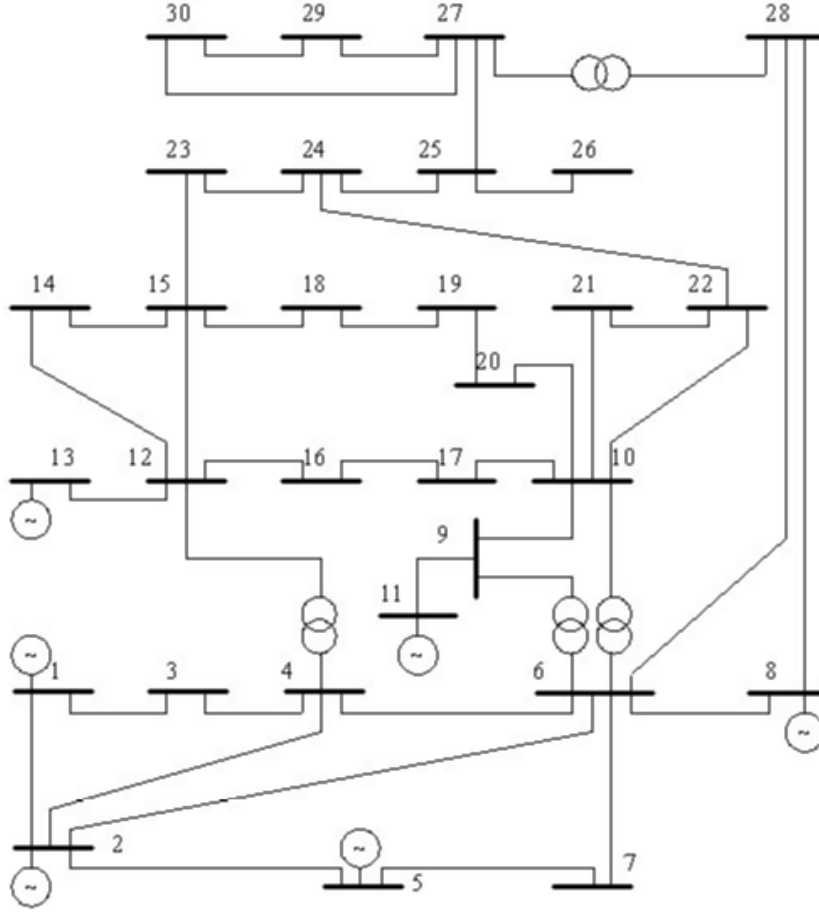
$$V_{kritik} = \frac{E_{Th}}{2\cos\delta}, \quad V_{kritik} \geq \frac{E_{Th}}{2} \quad (17)$$

$$VSM_V = \frac{V_{ölçülen} - V_{kritik}}{V_{kritik}} \quad (18)$$

olarak tanımlanır [13]. Burada VSM_V ; 1 ile 0 arasında değer almalıdır. VSM_V ’nin 1 olması, test barasının yüksüz olduğunu gösterir; bu değer sıfıra yaklaşması, baranın taşıma kapasitesinin sınırına gelindiğini, diğer bir deyişle gerilim kararsızlığına girileceğini ifade eder.

Bu çalışmada ilk olarak Denklem 5’in çözümünden elde edilen E_{Th} ile Denklem 10’dan elde edilen Z_{Th} değerleri için ilgili baraya ait V_{kritik} ve VSM_V marjini kritik noktaya ulaşana kadar adım adım hesaplanarak kararlılık analizi yapılmıştır (Yöntem 1). Daha sonra sadece Denklem 5’in çözümünden elde edilen E_{Th} ve Z_{Th} değerleri kullanılarak ilgili baranın V_{kritik} ve VSM_V marjini ilgili baralar için tekrar adım adım hesaplanmış (Yöntem 2) ve her iki yöntem ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

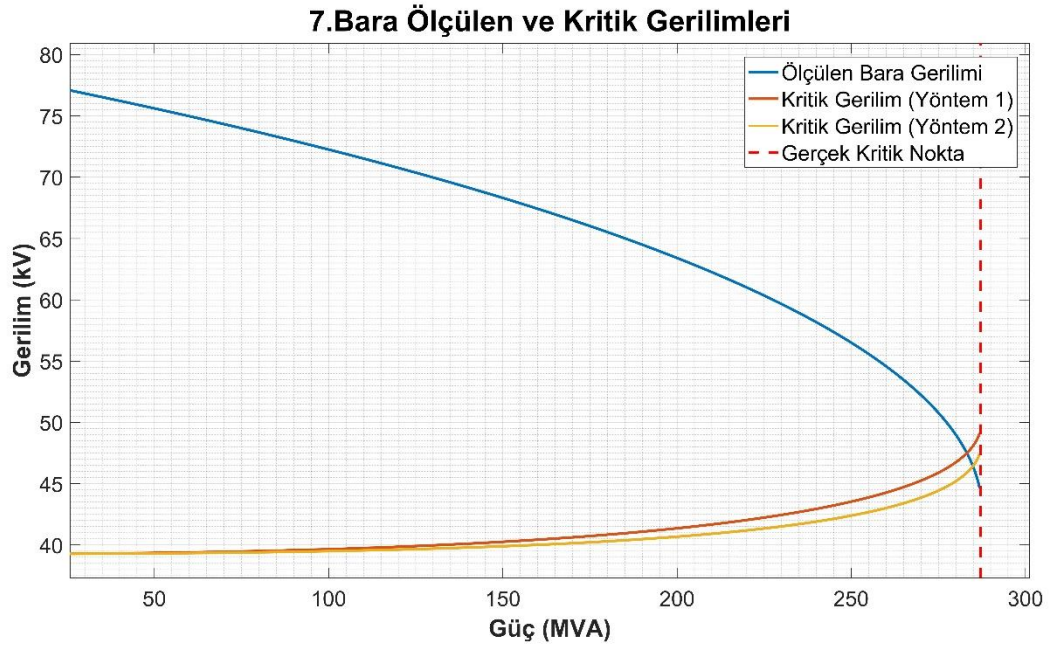
BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)



Şekil 5. IEEE30 baralı standart test sistemin tek hat şeması [21]

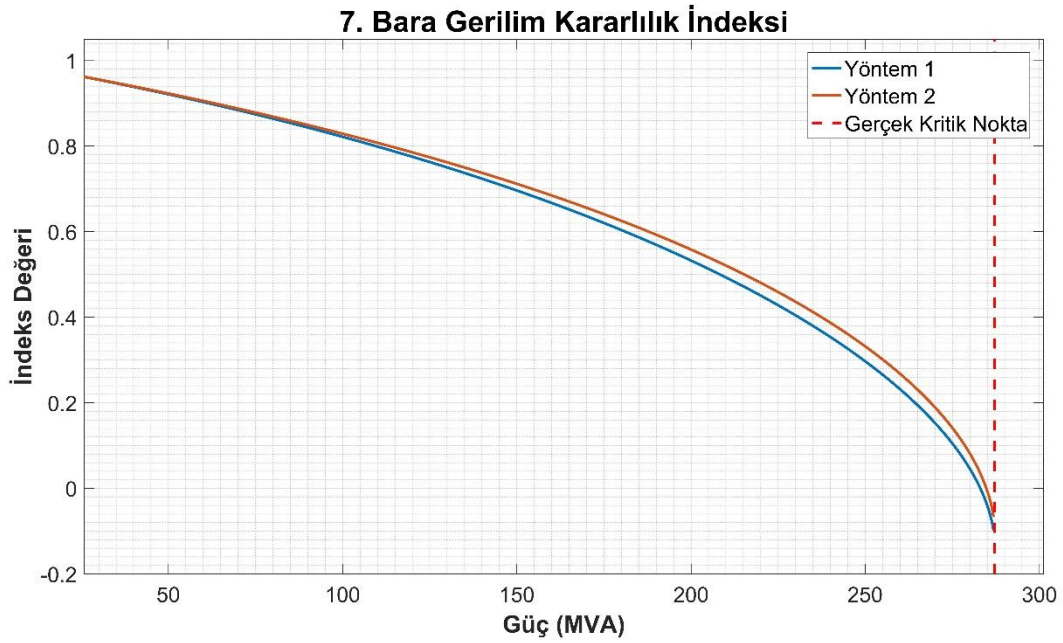
Figure 5. Single line diagram of IEEE30 bus standard test system

Yukarıda anlatılan her iki yöntem Şekil 5'te verilen IEEE 30 baralı standart test sisteminin 7, 14, 19 ve 30 numaralı yük baralarında denenmiş ve her baraya ait sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Grafiklerde ilk olarak baraya ait kritik gerilim değeri ve bara gerilim değeri her bir yüklenme değeri için sistem kritik noktaya ulaşana kadar adım adım hesaplanarak her iki yöntem için verilmiştir. Kritik gerilim ve bara gerilimi birbirine eşit olduğunda sistemin kritik değere ulaştığı anlaşılmaktadır (Şekil 6,8,10,12). Daha sonra kritik gerilim değerleri kullanılarak hesaplanan VSM_V marjinleri her iki yöntem için karşılaştırılmalı olarak ilgili baralardaki sonuçları verilmiştir (Şekil 7,9,11,13). Burada marjin değeri sıfır olduğunda sistemin kritik değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Bütün şekillerde sisteme ait gerçek kritik noktalar da dikey çizgi olarak verilmiştir.



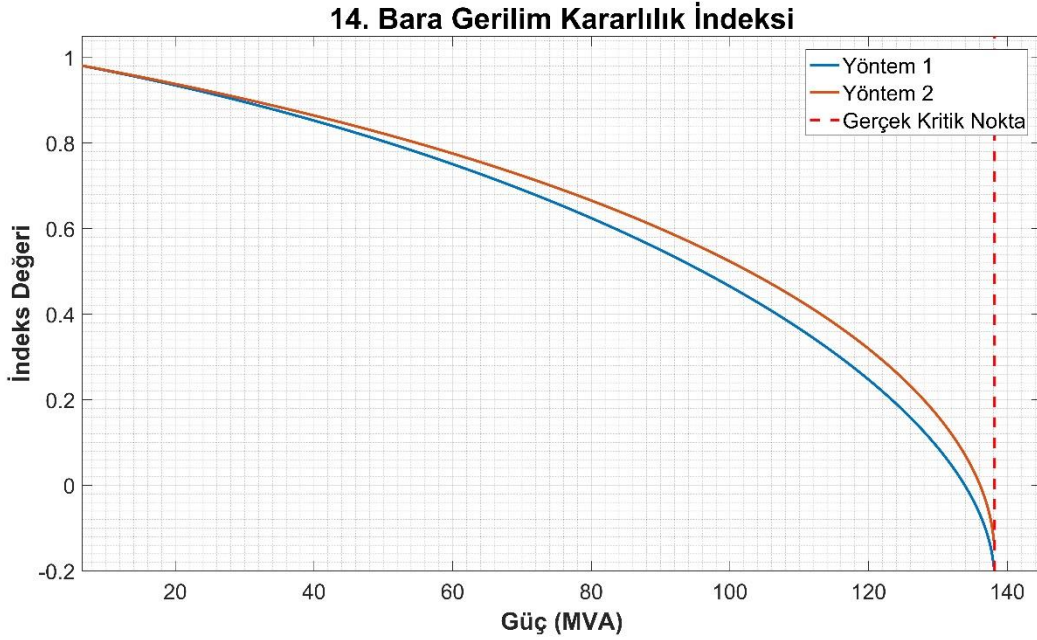
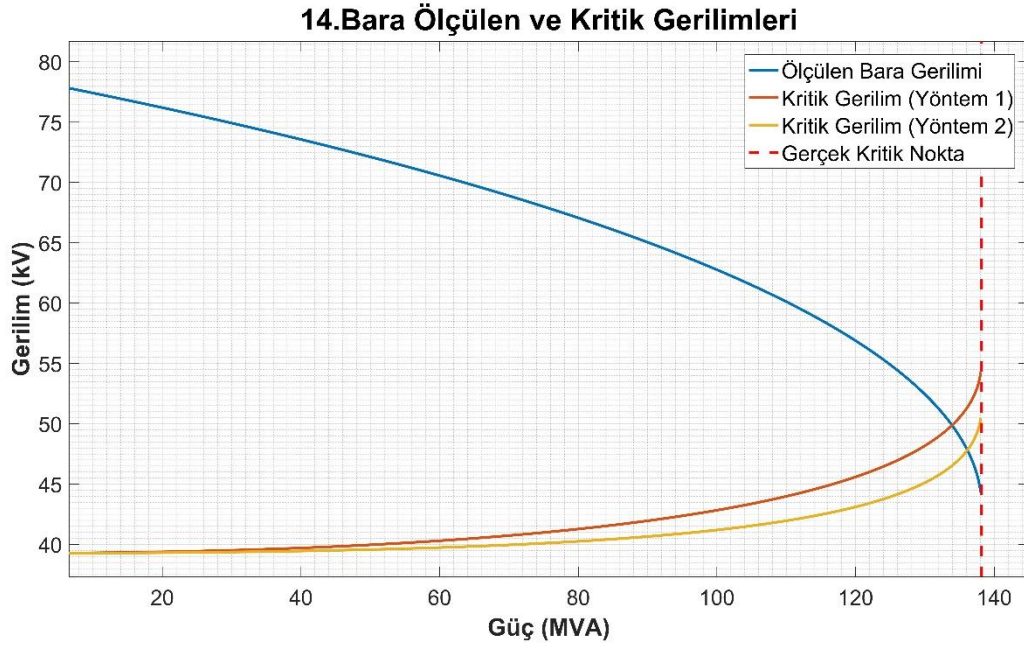
Şekil 6. Bara 7 için ölçülen ve kritik gerilimler grafiği

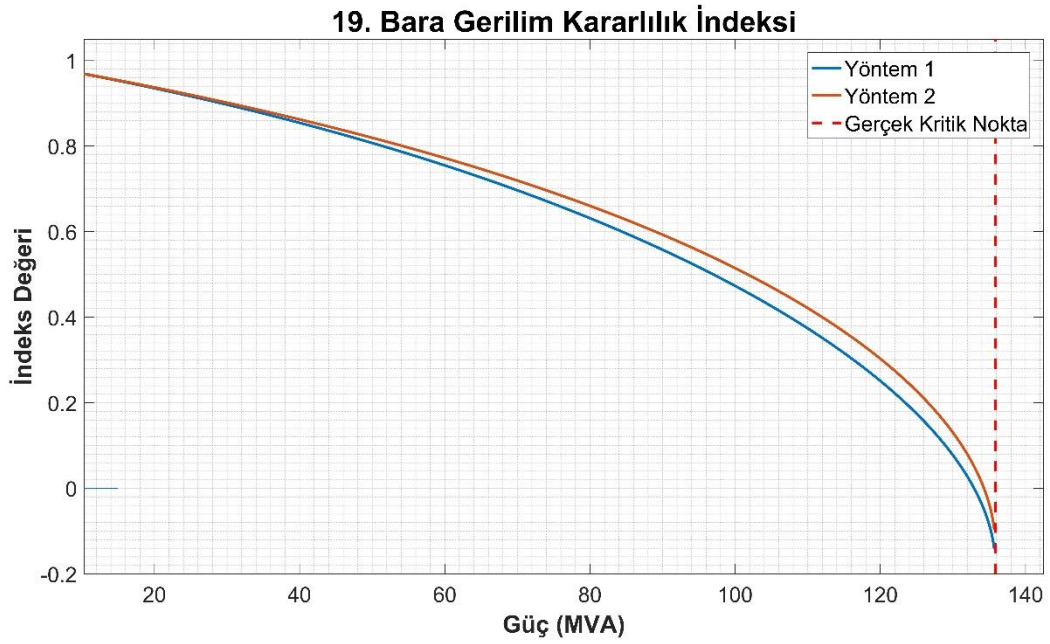
Figure 6. Measured and critical voltages graph for Bus 7



Şekil 7. Bara 7 için gerilim kararlılık marjini

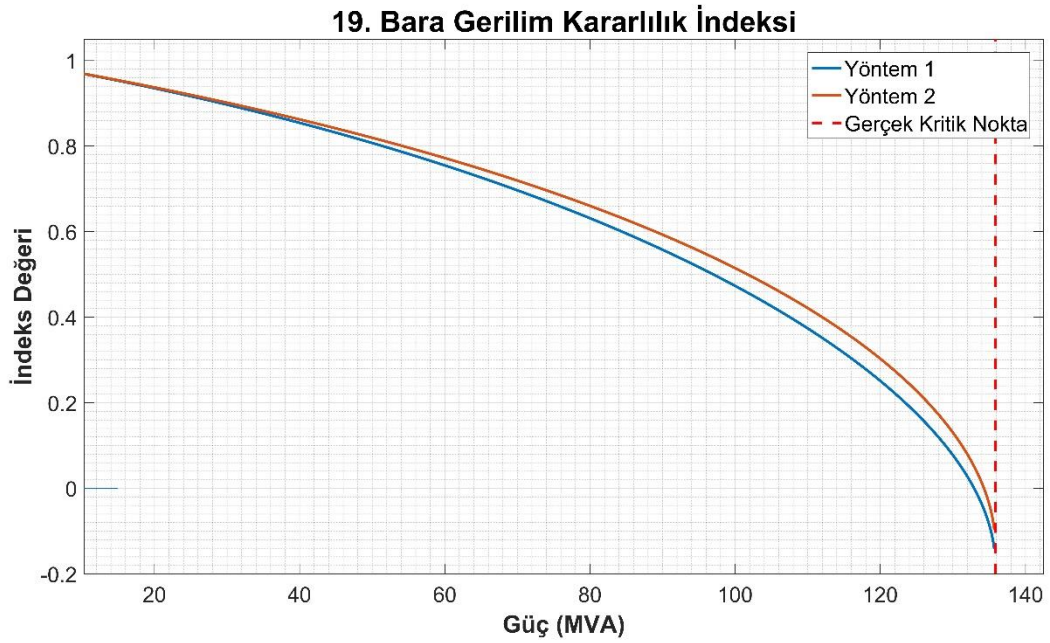
Figure 7. Voltage stability margin for Bus 7





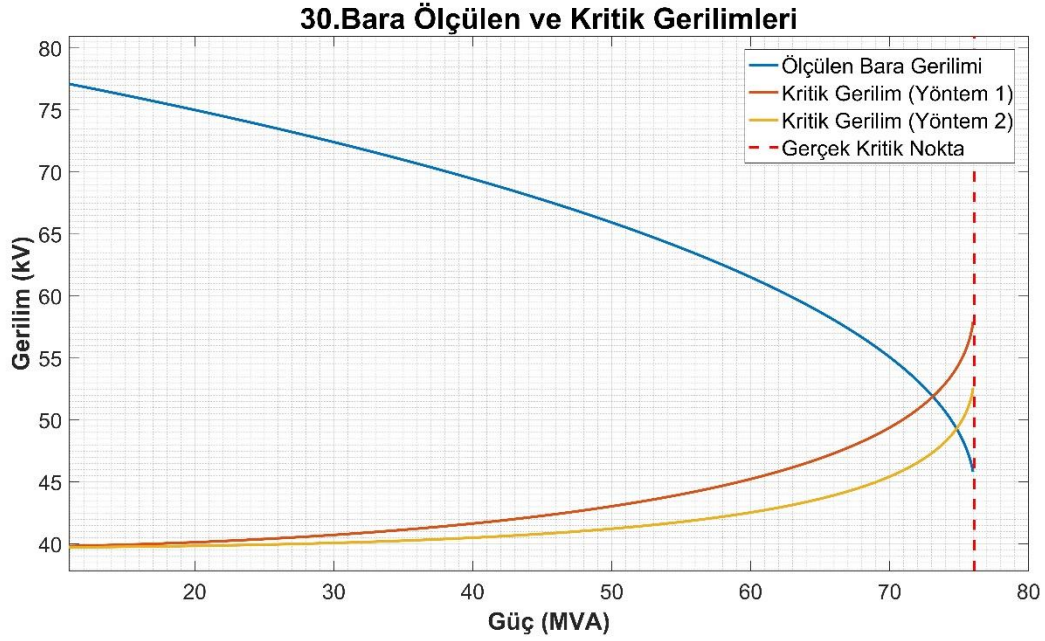
Şekil 10. Bara 19 için ölçülen ve kritik gerilimleri grafiği

Figure 10. Measured and critical voltages graph for Bus 19

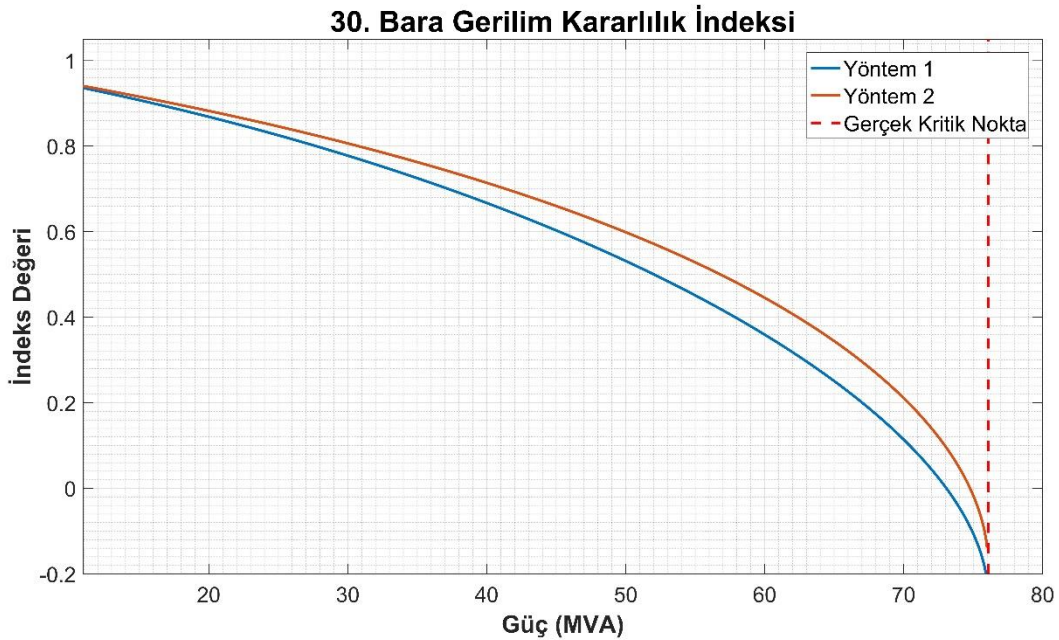


Şekil 11. Bara 19 için gerilim kararlılık marjini

Figure 11. Voltage stability margin for Bus 19



Şekil 12. Bara 30 için ölçülen ve kritik gerilimleri grafiği
Figure 12. Measured and critical voltages graph for Bus 30



Şekil 13. Bara 30 için gerilim kararlılık marjini
Figure 13. Voltage stability margin for Bus 30

IEEE 30 baralı Test sisteminin 7, 14, 19 ve 30 numaralı yük baralarından elde edilen veriler kestirim algoritmasında işlenerek analizi yapılacak olan baralara ait kritik gerilimler ve gerilim kararlılığı marjinaleri (VSM_V) hesaplanmıştır. Tüm testlerde gerilim kararlılığı sınırı doğru olarak belirlenmiş olup 7, 14, 19 ve 30 numaralı baralara ait kritik gerilim ve bara gerilimi grafikleri Şekil 6, 8,10 ve 12'de her iki yöntem için verilmiştir. Analizi yapılan baralara ait VSM_V marjinaleri Şekil 7, 9,11 ve 13'de verilmiştir. VSM_V sıfır olduğu S gücü, analizi yapılan baraları gerilim kararsızlığına sokan kritik güçlerdir. (VSM_V negatif değer almaz, Şekil 7, 9, 11 ve 13'deki negatif değerler, Yöntem 1'de kararsızlık noktasının gerçek kararsızlık noktasına göre erken kestirilmiş olmasından kaynaklanmıştır).

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada iki farklı yaklaşım ile IEEE 30 baralı test sisteminin 7, 14, 19 ve 30 numaralı yük baralarında gerilim kararlılığı analizi yapılmıştır. Yük baralarına ait V , I ve φ değerleri MATPOWER yazılımı ile bara yükleri adım adım artırılıp güç akışı yapılarak elde edilmiş ve bu verilere dayalı olarak gerilim kararlılığı analizi yapılmıştır. Elde edilen verilerle ilk olarak analizi yapılacak baraya ait E_{Th} ve Z_{Th} değerleri Yöntem 1 ile hesaplanmıştır. Hesaplanan E_{Th} ve Z_{Th} değerleri ile Denklem 17 'de verilen formül ile baralara ait V_{kritik} değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra Yöntem 2 ile analizi yapılan baralara ait E_{Th} ve Z_{Th} değerleri hesaplanmış ve hesaplanan bu değerler ile baralara ait V_{kritik} değerleri hesaplanmıştır.

Elde edilen verilerle analizi yapılacak baraya ait E_{Th} ve Z_{Th} değerleri iki farklı Yöntem ile ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan E_{Th} ve Z_{Th} değerleri kullanılarak incelenen baralara ait kritik gerilim (V_{kritik}) değerleri belirlenmiştir.

V_{kritik} değerlerinin yük akışı ile adım adım hesaplanan (veya ölçülen) bara gerilimine eşit olduğu (kesiştigi) noktada sistemin kritik değerlerine ulaşacağı öngörülmektedir. Ancak, her iki yöntemle de hesaplanan kritik noktalarının, ilgili baranın gerçek kritik noktasından daha küçük değerlerde kaldığı görülmektedir.

Hesaplanan V_{kritik} değerleri Denklem 18'te verilen gerilim kararlılığı marjini ile değerlendirilmiştir. Yöntem 1 ve Yöntem 2 ile elde edilen sonuçların hepsinde VSM_V 'nin gerilim kararsızlık sınırlarını maksimum % 5 hata sınırı içerisinde kestirdiği görülmüştür. Her iki yöntem ile elde edilen VSM_V marjinleri gerilim kararlılığı bakışı ile yük baralarının yüklenilebilme sınırı hakkında yeterli doğrulukta bilgi üretmektedir.

Yöntem 2'de, Yöntem 1'e göre daha az işlem yapılmaktadır. Buna rağmen, yapılan analizlerde Yöntem 2 ile belirlenen kritik gerilim ve kritik güç noktalarının gerçek kritik değerlere daha yakın olduğu görülmüştür.

Yöntem 1 ve Yöntem 2 ile sadece yük barasına ait veriler kullanılarak sistemin kritik değerlere yakınlığı hakkında bilgi edinilerek, güç sistemlerinin gerilim kararsızlığına girmesini engellemek için ilgili baradaki yükün atılması veya diğer önlemlerin alınması için kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Van Cutsem, T., Vournas, C.,1998, "Voltage Stability of Electric Power Systems", *Kluwer Academic Publishers*.
- Van Cutsem, T., Vournas, C.,1996, "Voltage Stability Analysis in Transient and Mid-term Time Scales," *IEEE Transactions in Power Systems*, Cilt 11, Sayı 1, ss. 146-154,
- Glover, J.D., Sarma, M.S.,2001, "Power System Analysis and Design", *Brooks/Cole*, 3. Baskı,
- Crow, M., 2002, "Computational Methods for Electric Power Systems", *CRC Yayınları*.
- Canizares, C.A., De Souza, A.Z., Quintana, V.H., 1996, "Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Cilt 11, Sayı 3, ss. 1441-1450.
- Chiang, H.D., Jean-Jumeau, R.,1993, "Toward a Practical Performance Index for Predicting Voltage Collapse in Electric Power Systems", *Proceeding of the 1993 IEEE/PES Summer Meeting*.
- Kessel, P., Glavitsch, H.,1986," Estimating The Voltage Stability of A Power System, *IEEE Transactions on Power Systems*", Cilt 1, Sayı 3, ss. 346-354,

- Tuan, T.Q., Fandino, J., Hadjsaid, N.J., Sabonnadiere, C., VU., H.,1994,“Emergency Load Shedding to Avoid Risks of Voltage Instability Using Indicators”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 9, Sayı 1, ss. 341-351.
- Vu, K., Begovic, M., Novosel, D., Saha, M.,1999,“Use of Local Measurements to Estimate Voltage-Stability Margin”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 14, Sayı 3, ss. 1029-1035.
- Milosevic, B. , Begovic, M.,2003,“Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurement”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 18, Sayı 1, ss. 121-127.
- Haque, M.H. ,2003,“ On-line Monitoring of Maximum Permissible Loading of A Power Within The Voltage Stability Limits”, *IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution*, London, UK.
- Turan, M; Demircioğlu, S.B. ; Yalçın, M. A. ,2006,“ Voltage Stability Evaluation by Using Maximum Power Transfer Phasor Diagram”, *Journal of Applied Sciences*, Cilt 6,Sayı 13,ss. 2809-2812, Asian Network for Scientific Information
- Demircioğlu, S. B. ,2006, “Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- Cardet, C.E.D, Analysis on Voltage Stability Indices, AACHEN University, Master Thesis, 2010.
- Ghaghishpour A., Koochaki A.,2020,“ An intelligent method for online voltage stability margin assessment using optimized ANFIS and associated rules technique” *ISA Transactions*.
- Rodriguez-Garcia L.,Perez-Londono S., Mora-Florez J.,2019,“ An optimization-based approach for load modelling dependent voltage stability analysis”, *Electric Power Systems Research*,, Cilt 177, ss. 105960.
- Glavic, M., Van Cutsem T.,2009,“ Wide-Area Detection of Voltage Instability from Synchronized Phasor Measurements”, *Part I: Principle, IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 24, Sayı 3, ss. 1408-1416.
- Glavic, M., Van Cutsem T.,2009,“Wide-Area Detection of Voltage Instability from Synchronized Phasor Measurements”, *Part II: Simulation Results, IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 24, Sayı 3, ss. 1417-1425.
- Glavic, M., Van Cutsem T.,2008,“ Detecting with PMUs The Onset of Voltage Instability Caused by A Large Disturbance”, *Proceedings 2008, IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Pittsburgh, PA.
- Burchett, Stephen M.,Douglas, Daniel,Ghiocel, Scott G.,2018,“ An Optimal Thévenin Equivalent Estimation Method and its Application to the Voltage Stability Analysis of a Wind Hub”, *IEEE Transactions on Power Systems* ,Cilt 33, Sayı 4, ss. 3644-3652.
- A. Mahari, H. Seyedi, 2016,“ A wide area synchrophasor-based load shedding scheme to prevent voltage collapse”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Cilt 33, ss. 248-257.
- IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions,2004, “Definition and Classification of Power System Stability”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Cilt 19, Sayı 2, ss.1387-1401.
- Mandoulidis P., Vournas C.,2020,“ A PMU-based real-time estimation of voltage stability and margin”, *Electric Power Systems Research*, Cilt 178, ss. 106008.
- IEEE 30 Bus Standart Test System, <https://www.al-roomi.org/power-flow/30-bus-system>, (10.05.2019).



RADYAL ŞEBEKELERDE DESTEK VEKTÖR REGRESYON İLE OPTİMUM KABLO TOPRAKLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Bahadır AKBAL

*Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE*

bakbal@ktun.edu.tr

Geliş/Received: 13.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 15.06.2020)

ÖZ: Teknolojinin gelişmesi ile elektrik şebekelerindeki yüklerin çeşitliliği de artmıştır. Bu çeşitli yükler şebekede sıfır bileşen ve harmonik akımlarını artırarak yüksek gerilim yeraltı kablolarında başlık arızalarına neden olmaktadır. Uygulamada kablo başlığı arızalarını önlemek için genellikle IEEE 575-1988 standardında yer alan çift taraflı topraklama (ÇTT) yöntemi kullanılmaktadır. Fakat bu yöntem sıfır bileşen ve harmonik akımlarının neden olduğu kablo başlığı arızalarını önlemek için yeterli değildir. Bu çalışmada yeni bir yöntem olan Parçalı Çift Taraflı Topraklama (PÇT) yöntemi ile ÇTT yöntemi karşılaştırılmıştır. PÇT yönteminin kullanılması için kabloda oluşacak olan kılıf geriliminin bilinmesi gereklidir. Bu yüzden Destek Vektör Regresyon (DVR) yöntemleri ile kılıf gerilimi tahmini yapılmıştır. Daha sonra kablo arızalarını ve elektrik çarpmalarını önlemek için PÇT yöntemi dokunma gerilimine göre optimize edilmiştir. Optimizasyon yöntemleri olarak da Parçacık Sürü Optimizasyonu, İnertia Ağırlıklı Parçacık Sürü Optimizasyonu, Çekimsel Arama Algoritması ve Genetik Algoritma kullanılmıştır. Çalışma sonunda, yüksek gerilim kablosunun topraklamasının ÇTT yöntemi ile yapılması durumunda kılıf geriliminin dokunma gerilimini aştığı görülmüştür. Bu durum dengesiz elektrik alanı nedeniyle kablo arızasına, yüksek gerilim nedeniyle de elektrik çarpılmasına neden olmaktadır. Aynı hat için tasarlanan optimize edilmiş PÇT yöntemlerinde ise kılıf gerilimi aşılamamıştır. Böylece PÇT yöntemi ile hem kablo arızalarının hem de elektrik çarpmalarının önüne geçilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek gerilim kablosu, Topraklama, Regresyon, Optimizasyon

Optimum Cable Bonding Design in High Voltage Cables by Regression in Radial Network

ABSTRACT: With the development of technology, the variety of loads in electrical networks has also increased. These various loads increase the zero component and harmonic currents in the network and cause cable termination faults in high voltage underground cables. In practice, the solid bonding (SB) method, which is included in the IEEE 575-1988 standard, is generally used to prevent cable termination faults. However, this method is not sufficient to prevent cable termination faults caused by zero component and harmonic currents. In this study, a new method, the sectional solid bonding (SSB) method and the SB method were compared. In order to use the SSB method, it is necessary to know the sheath voltage that will occur in the cable. Therefore, sheath voltage estimation is made with the Support Vector Regression (SVR) methods. Later, the SSB method is optimized with touch voltage to prevent cable failures and electrical distortions. Particle Swarm Optimization, Inertia Weighted Particle Swarm Optimization, Gravitational Search Algorithm and Genetic Algorithm were used as optimization methods. At the end of the study, it has been observed that the sheath voltage exceeds the touch voltage in case the grounding of the high voltage cable is performed by the SB method. This causes cable failure due to unbalanced electric field and electric shock due to high voltage. In the optimized SSB methods designed for the same line, the

sheath voltage is not exceeded. Thus, both cable faults and electrical shock will be prevented by the SSB method.

Key Words: *High voltage cable, Bonding, Regression, Optimization*

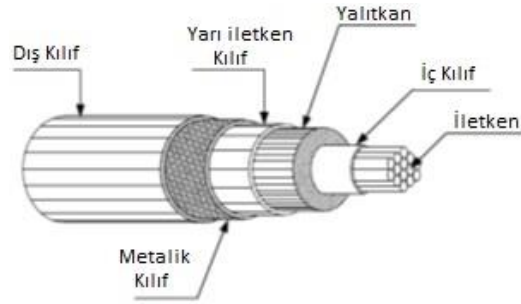
GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kayıpların düşürülmesi için iletken kesiti artırılmaktadır. Fakat hat uzunluğu veya talep edilen güç yüksek ise kayıpların azaltılması için sadece kesit artırımı yetmez. Bu durumda yüksek gerilimli hatlar kullanılarak kayıplar düşürülmektedir. Yüksek gerilimden dolayı oluşan yüksek elektrik alanı yalıtım sorunlarına neden olur. Bu yüzden elektrik enerjisinin taşınması için kullanılan havai ve yeraltı kablolu hatlar, yalıtım hatalarından dolayı oluşan kısa devreleri önlemek için yüksek elektrik alanına göre tasarlanırlar. Havai hatlarda yalıtkan olarak hava göz önünde bulundurulurken, yüksek gerilim yeraltı kablolarında genellikle PVC (polivinil klorür) veya XLPE (çapraz bağlı polietilen) yalıtkan malzeme olarak kullanılmaktadır.

Havai hatların maliyetinin yeraltı kablolu hatlara göre daha düşük olması uzun hatlarda kullanılma nedenlerinin başında gelmektedir. Fakat havai hat iletkenlerinde herhangi bir yalıtkan malzeme kullanılmaması ve havanın elektrik alan dayanımının diğer yalıtkan malzemelere göre düşük olması, özellikle yerleşim yerlerinde önemli yalıtım sorunlarına neden olmaktadır. PVC ve XLPE yalıtkanlarının elektrik alan dayanımları havaya göre yüksek olması, yüksek gerilim kablolu hatların hem daha güvenli enerji dağıtımına hem de yüksek gerilim tesislerinde daha az yere gereksinim duyulmasına olanak sağlar (Bak ve diğ., 2016). Dolayısıyla şehir merkezlerinde ve kalabalık yerleşim yerlerinde yüksek gerilimli elektrik dağıtımı yeraltı kabloları ile sağlanmaktadır. Ayrıca yüksek gerilim kablolarının yalıtkan özelliğinin iyi olmasından dolayı yüksek gerilimli elektrik tesislerinde birçok bağlantı yüksek gerilim yeraltı kabloları ile sağlanır. Özellikle yüksek gerilim aygıtlarının trafo ve jeneratöre olan bağlantıları da yüksek gerilim yeraltı kabloları ile yapılmaktadır.

Yeraltı kablolu hatlar sadece şehir merkezi gibi kalabalık ortamlarda değil aynı zamanda havai hatların tesis edilemeyeceği deniz aşırı ülkelere elektrik enerjisinin taşınmasında da kullanılmaktadır (Benato ve diğ., 2017). Görüldüğü üzere çoğu kez havai hatlar ile yeraltı kablolu hatlar birlikte kullanılmakta (Shuai ve diğ., 2016; Jittiphong ve diğ., 2017; Jiali ve diğ., 2019; Gatta ve diğ., 2005) ve elektrik şebekelerinde yüksek gerilim yeraltı kablolarının kullanımına olan gereksinim de gün geçtikçe de artmaktadır. Bu yüzden yüksek gerilim yeraltı kablolarının arızalarının önlenmesi enerji sürekliliği açısından önemlidir.

Yüksek gerilim yeraltı kabloları birçok tabakadan oluşmakta ve gerilim seviyesi arttıkça tabaka sayısı da artmaktadır. Özellikle çok daha yüksek gerilimlerde tabakalar arasında düzgün zorlanma koşulu sağlanarak kablo boyutunun aşırı büyümesinin önüne geçilir. Şekil 1’de bir yüksek gerilim kablosunun tabakaları gösterilmektedir. Yalıtkan tabakanın üzeri yarı iletken bir malzeme ile kaplanarak yalıtkan üzerindeki elektrik alanı hem düzgünleştirilir hem de sınırlandırılır (Sachin ve Arun, 2016). Yarı iletken malzemenin üzerinde ise bir metalik kılıf bulunmaktadır. Bu kılıf, kablonun yalıtkan tabakasını dış darbelerle karşı korurken elektrik alanının da düzgün dağılımına yardımcı olur.

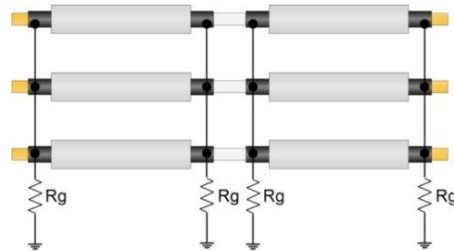


Şekil 1. Yüksek gerilim kablosu (Tziouvaras, 2006)

Figure 1. High voltage cable

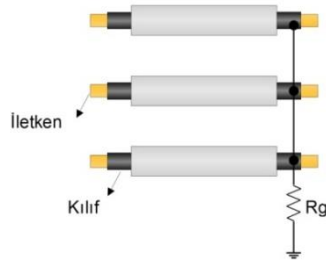
Yüksek gerilim kabloları ile yüksek gerilim ekipmanları arasındaki bağlantı için kablo başlıkları kullanılmaktadır. Kablo başlıkları yüksek gerilim kablolarına monte edilir ve yüksek gerilim ekipmanı ile toprak arası atlamaların engellenmesi için kullanılmaktadır. Kablo başlıkları, dış ortam (harici) ve iç ortam (dâhili) kablo başlıkları şeklinde üretilmektedir. Kablo bağlantı yerine göre iç veya dış ortam kablo başlığı kullanılmaktadır.

Metalik kılıf yalıtkan tabakayı korurken yük akımından dolayı üzerinde gerilim oluşur (Czapp ve diğ., 2014). Eğer metalik kılıf topraklanmazsa, kablo uzunluğunun da artması ile kılıf üzerindeki gerilim büyür (Gouramanis ve diğ., 2011). Özellikle yüksek gerilim kablosuna kablo başlığı takılırken yalıtkan üzerinde bulunan yarı iletken malzeme yalıtkan üzerinden kazındığı için kılıf üzerindeki gerilim artışı kablo başlığı üzerinde dengesiz ve yüksek elektrik alanı oluşmasına neden olur. Bu yüzden yüksek gerilim kabloları kablo başlık noktalarından, kılıf üzerindeki potansiyeli sıfırlamak için topraklanırlar. Metalik kılıf topraklaması genellikle IEEE 575-1988 standardına göre yapılmaktadır (Jung ve diğ., 2007). Bu topraklama yöntemleri tek taraflı, çift taraflı ve çapraz topraklama yöntemleridir ve sıra ile Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. Uygulamada genellikle kısa hatlarda tek taraflı topraklama, uzun hatlarda ise çift taraflı topraklama kullanılmaktadır. Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilen R_g dirençleri ise toprak geçiş dirençlerini temsil etmektedir.



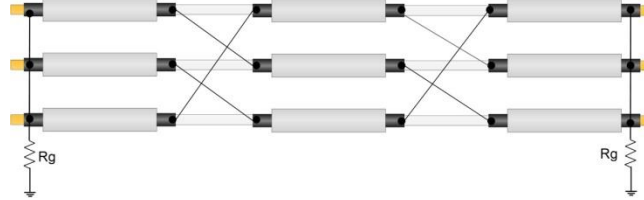
Şekil 2. Tek taraflı topraklama

Figure 2. Single point bonding



Şekil 3. Çift taraflı topraklama

Figure 3. Solid bonding



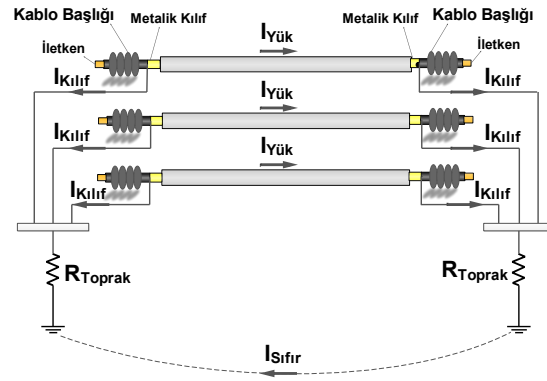
Şekil 4. Çapraz topraklama

Figure 4. Cross bonding

Kablo arızaları genellikle yalıtkan tabakanın zarar görmesi veya dış etkilerden dolayı yaşlanarak yalıtkanlık özelliğini yitirmesinden kaynaklanır. Yalıtkanın yaşlanması yani yalıtkanlık özelliğini yitirmesinde, yüksek elektriksel zorlanma ve sıcaklık artışı en önemli etkenlerdir (Shuai, 2016; Bessissa ve diğ., 2016; Yunus, 2016). Yüksek gerilim kabloları başlık noktalarından topraklandığında kablonun metalik kılıfından kılıf akımı akmaya başlar (Ruiz ve diğ., 2007; Jung ve diğ., 2005; Mingzhen ve diğ., 2019; Xiang ve diğ., 2017). Metalik kılıftan akan akım kablonun yalıtkan tabakası üzerinde hem sıcaklığı hem de elektrik alanını artırarak yalıtkanın yaşlanmasına dolayısıyla arızalanmasına neden olur. Özellikle kablo başlığı yapılırken işçilik hataları da varsa kablo arızaları kaçınılmazdır. Ayrıca yük akımı harmonik içeriyorsa kablonun metalik kılıfı tıpkı bir transformatör gibi çalıştığı için metalik kılıfta aynı zamanda akım harmonikleri de görülür. Bu harmonik akımları ise hem kılıf gerilimini hem de sıcaklığı artırmaktadır (Zhonglei ve diğ., 2012).

Harmonik bozunumu artıran en önemli etken güç elektroniği elemanlarıdır. Güç elektroniği elemanları endüstride ve yenilenebilir enerji kaynaklarında sıkça kullanılmakta olup kullanımı da her geçen gün artmaktadır. Bundan dolayı bu sorun şebeke için daha büyük boyutlara gelecek ve yeraltı kablolu hatlarda bundan olumsuz etkilenecektir.

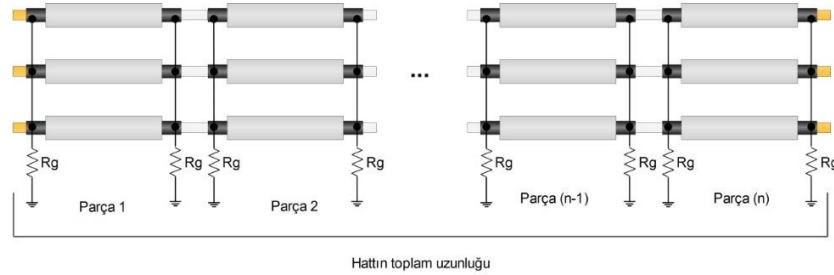
Ayrıca dengesiz yük akımı ve akım harmoniklerinden dolayı güç trafolarının nötründen sıfır bileşen akımı akmaktadır (Zhangping ve diğ., 2015). Bu sıfır bileşen akımları devrelerini kabloların metalik kılıflarından tamamlamaktadır (Jiangchao ve diğ., 2015, Mehdi ve diğ., 2014). Dolayısıyla sıfır bileşen akımı kılıf gerilimini artırarak kablo başlık noktalarındaki dengesiz elektrik alan şiddetini artırdığı gibi harmonikli akım barındırdığı için yalıtkan sıcaklığını da yükseltecektir. Ayrıca şebekedeki yüksek gerilim kablo arızaları incelendiğinde, yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlarda arızaların genellikle başlık bölgesinde olduğu görülmüştür. Kabloların başlık noktalarından topraklanmasına rağmen başlık arızalarının görülme nedeni kullanılan topraklama yöntemlerinin günümüz koşullarında yetersiz olmasıdır. Görüldüğü üzere kablo başlığı arızalarının başlıca nedenleri sıfır bileşen akımı, elektrik alan dengesizliği ve akım harmonikleridir. Bu durum Şekil 5'te de gösterilmektedir.



Şekil 5. Metlik kılıf topraklama

Figure 5. Grounding of metallic sheath

Sıfır bileşen akımı ve akım harmonikleri kaynaklı kablo başlığı arızalarını önlemek için Parçalı Çift Taraflı (PÇT) topraklama yöntemi geliştirilmiştir (Akbal, 2018). Bu yöntem Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. Parçalı çift taraflı topraklama

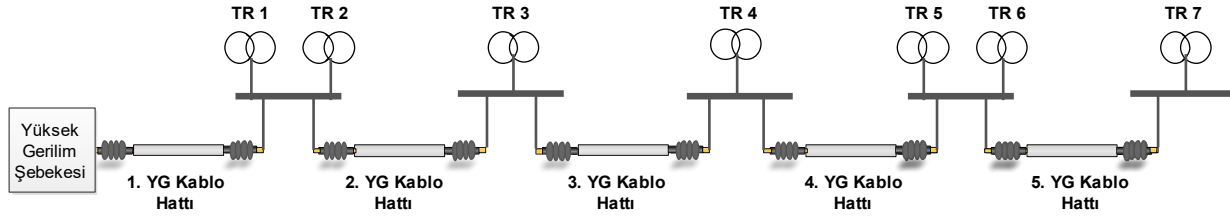
Figure 6. The sectional solid bonding

PÇT yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en önemli özelliği ise bu yöntemin tasarlanırken bu sıfır bileşen ve akım harmoniklerinin göz önünde bulundurulmasıdır. PÇT yönteminde toplam hat uzunluğu parçalara ayrılır ve her parça çift taraflı olarak topraklanır. PÇT yönteminde, yapılacak olan kablo topraklamasının en güvenli ve en ekonomik olması amaçlanmaktadır. Dolayısıyla optimum parça uzunluğu ve toprak geçiş direncinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada PÇT yönteminin optimizasyonu yapılmış ve sonuçları IEEE 575-1988 standardında önerilen çift taraflı topraklama yönteminin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

PÇT yönteminde uygun bir topraklama için parçaların uzunluğu ve kılıf toprak geçiş dirençlerinin değerleri önemlidir. Materyal ve yöntem bölümünde PÇT parametrelerinin en uygun değerlerinin elde edilmesinde kullanılan algoritma ve önerilen yöntemler tanıtılmıştır.

Elektrik şebekeleri tasarlanırken radyal, ring ya da ağ şebeke yapılarına göre tasarlanırlar. Yük yoğunluğuna göre de kullanılacak şebeke tipi seçilir. Şehir merkezlerinde elektrik enerjisi genellikle alçak gerilimle dağıtılır ve yük yoğunluğu da fazladır. Bu gibi yerlerde ağ tipi şebeke kullanılır. Yüksek gerilimle enerji dağıtımında ise genellikle radyal ve ring şebeke tipleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada Şekil 7'de gösterilen radyal tip şebeke yapısında kullanılan yüksek gerilim kabloları için regresyon tabanlı PÇT yönteminin tasarımı ve uygulaması yapılacaktır.



Şekil 7. Radyal şebeke

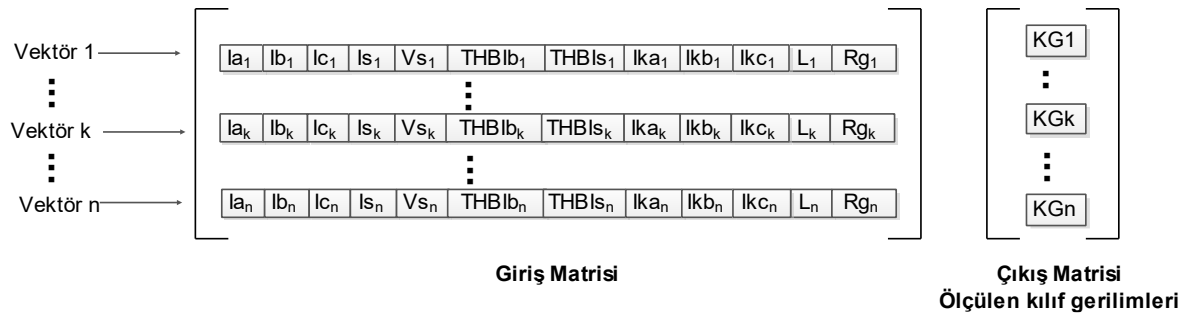
Figure 7. Radial network

Kablo başlığı arızalarının önlenmesi için yeraltı kablolu hattın özelliğine göre PÇT parametrelerinin, hat kurulmadan önce yani proje aşamasında iken belirlenmesi gereklidir. PÇT parametrelerinin optimizasyonunda metalik kılıf üzerinde oluşan kılıf gerilimi kullanılmaktadır. Optimizasyon problemlerinin çözümünde bir amaç fonksiyonu gereklidir. Dolayısıyla kılıf gerilimini belirleyecek bir amaç fonksiyonuna gerek vardır. Bu amaç fonksiyonu çoğu kez bir matematiksel formüldür. Fakat kılıf geriliminin matematiksel formülünün elde edilmesi karmaşıktır. Çünkü kılıf gerilimi üzerinde birçok parametre etkindir. Ayrıca literatürde bunun üzerine yapılan bir çalışmada matematiksel formülün doğruluk değerinin düşük olduğu da belirtilmiştir (Marina ve diğ., 2019). Dolayısıyla bu çalışmada kılıf geriliminin belirlenmesinde Destek Vektör Regresyon (DVR) yöntemleri kullanılmıştır.

DVR yöntemi doğrusal olmayan problemlerin çözümünde, özellikle tahmin ve tanıma çalışmalarında kullanılmaktadır (Alex,2004). DVR yöntemi de kendi içinde kollara ayrılmaktadır. Bunlar, Linear DVR (LDVR), Quadratic DVR (QDVR), Cubic DVR(CDVR), Fine Gaussian DVR (FGDVR), Medium Gaussian DVR (MGDVR), Coarse DVR (CoDVR) şeklindedir. Bu çalışmada kılıf geriliminin tahmini için sayılan DVR yöntemlerinin eğitim sonuçları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda eğitim hatası en düşük olan DVR yöntemi PÇT yönteminin optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

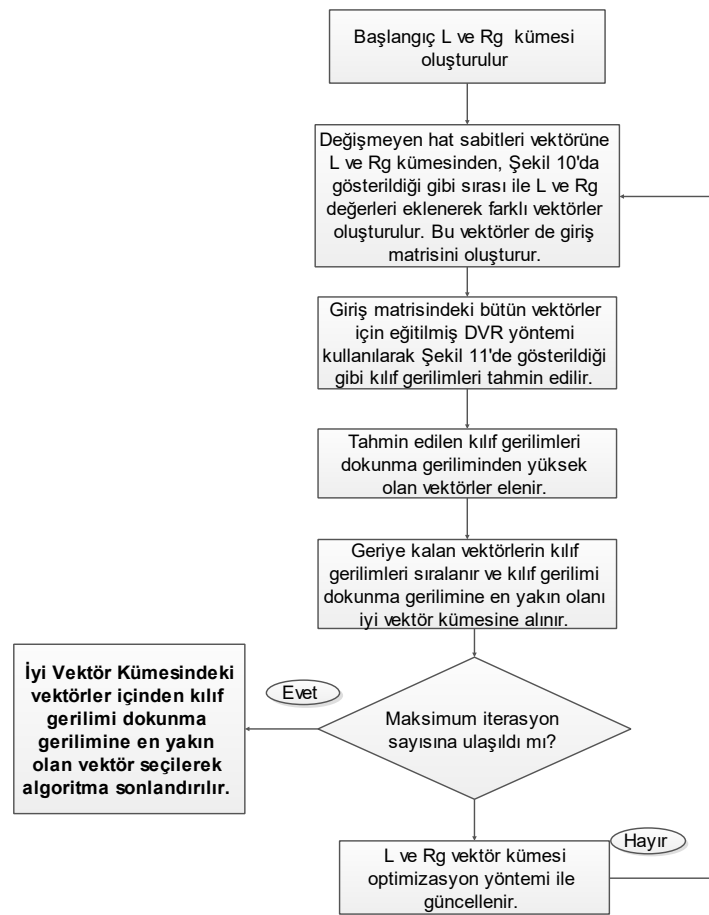
DVR yöntemi ile yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlarda oluşacak olan kılıf gerilimini tahmin etmek için öncelikle bu yöntem eğitilmelidir. Eğitim işlemi için de giriş ve çıkış verileri gereklidir. Bu çalışmada eğitim parametrelerinin belirlenmesi için literatür araştırması, benzetim çalışmaları ve uygulamada karşılaşılan kablo başlığı arızalarının incelemesi yapılmıştır.

Benzetim çalışmaları için PSCAD/EMTDC benzetim programı kullanılmış ve farklı yüksek gerilim yeraltı kablolu hatlar oluşturularak, bu hatlarda oluşan kılıf gerilimleri üzerindeki etkili parametreler belirlenmiştir. Literatürden, benzetim çalışmalarından ve uygulamadan görüldüğü üzere kılıf gerilimi üzerinde hat uzunluğu (L), kılıf toprak geçiş direnci (Rg), hat akımları (Ia, Ib, Ic), sıfır bileşen akımı (Is) ve gerilimi (Vs), hat başı toplam akım harmoniği bozunumu (THBIb), hat sonu toplam akım harmoniği bozunumu (THBI), her bir faza ait kablodaki kılıf akımlarının (Ika, Ikb, Ikc) etkin olduğu görülmüştür. PSCAD/EMTDC benzetim programında, farklı hatlar için Ia, Ib, Ic, Is, Vs, THBIb, THBI, Ika, Ikb, Ikc, L ve Rg parametre değerlerine göre benzetim yapılmış ve bu hatlara ait kılıf gerilimleri (Vk) ölçülmüştür. DVR yöntemlerinin eğitim çalışmalarında Ia, Ib, Ic, Is, Vs, THBIb, THBI, Ika, Ikb, Ikc, L ve Rg parametreleri giriş verileri ve bu parametre değerlerine göre PSCAD/EMTDC benzetim programında ölçülen Vk değerleri de çıkış verileri olarak kullanılmıştır. DVR yöntemlerinin eğitiminde kullanılan giriş ve çıkış verilerinin bulunduğu matrisler Şekil 8'de özetlenmiştir.



Şekil 8. Eğitimde kullanılan giriş ve çıkış matrisleri
Figure 8. Input and output matrices for training of regression methods

Bu yöntemlerin eğitim hata oranları 4 ayrı yöntemle incelenmiştir. Bu yöntemler, Kare Ortalamalarının Karekökü (KOK), R Kare Hatası (R-KH), Ortalama Kareler Hatası (OKH) ve Mutlak Ortalama Hata (MOH) şeklindedir. Belirtilen eğitim hatalarına göre oranı en düşük yöntem, PÇT optimizasyonunda kullanılan optimizasyon yöntemlerinin amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. PÇT yönteminin optimizasyonu Şekil 9'da gösterilen algoritmaya göre yapılmıştır.



Şekil 9. PÇT optimizasyon algoritması
Figure 9. The algorithm of PÇT optimization

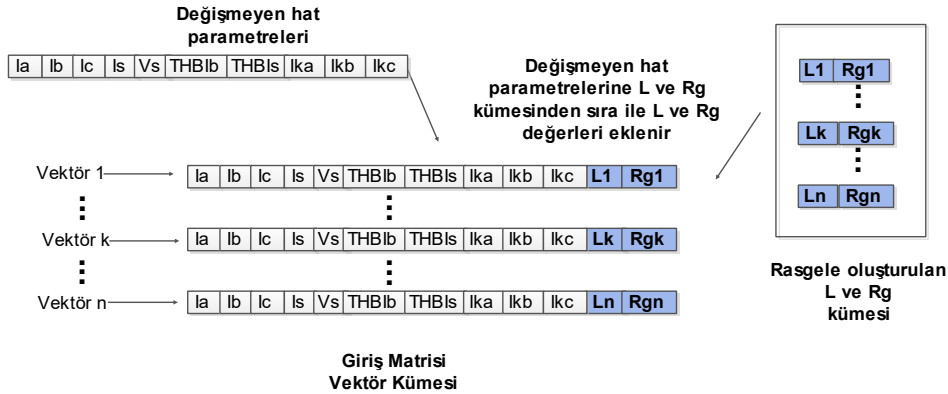
Şekil 9'da gösterilen PÇT parametreleri optimizasyon algoritmasında, kılıf geriliminin dokunma geriliminden düşük ve parça sayısının da minimum olması istenmektedir. Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği alternatif akımda dokunma geriliminin sınır değerini 50 V (etkin değer)

olarak belirlemiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da dokunma gerilimi 50 V (etkin) olarak kabul edilmiştir. Kılıf geriliminin dokunma geriliminden düşük olması ile can kayıplarının önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

PÇT optimizasyonunda eğitimi tamamlanmış DVR yöntemi ile hatta oluşacak kılıf gerilimi tahmin edilir. Eğer tahmin edilen bu gerilim dokunma gerilimine de en yakın değerde ise parça uzunluğu en yüksek değerdedir. Bu da PÇT yöntemindeki parça sayısının minimum olacağı anlamına gelir. Bu sayede hem güvenlik hem de ekonomiklik sağlanmış olacaktır.

PÇT optimizasyon algoritmasında kılıf geriliminin tahmin edilebilmesi için giriş verilerine gerek vardır. Proje aşamasında kablodan akacak olan yük akımları yaklaşık olarak hesaplandığı için bu hatta oluşacak olan sıfır bileşen akımı (I_s), sıfır bileşen gerilimi (V_s), hat başı toplam akım harmoniği bozunumu (THB1b), hat sonu toplam akım harmoniği bozunumu (THB1s), her bir fazda bulunan kablodaki kılıf akımları (I_{ka} , I_{kb} , I_{kc}) da yaklaşık olarak PSCAD/EMTDC programında belirlenmiştir.

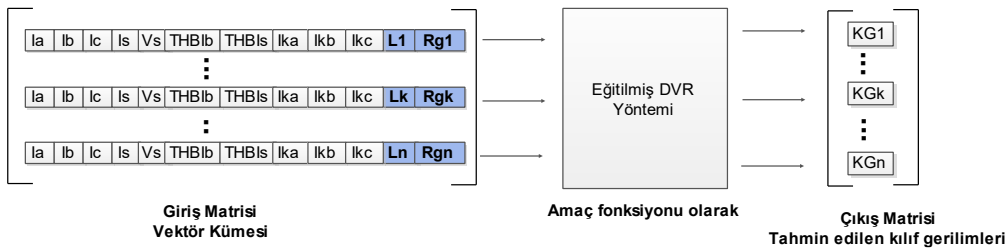
Kılıf geriliminin tahmininde kullanılacak giriş matrisinin her bir elemanı bir vektör olarak tanımlanmıştır. Bir vektör oluşturulurken I_a , I_b , I_c , I_s , V_s , THB1b, THB1s, I_{ka} , I_{kb} ve I_{kc} parametreleri de belli olduğu için bu veriler sabit tutulmuş, değişik L ve Rg parametre değerleri ile giriş matrisinin vektörleri oluşturulmuştur. Şekil 10'da PÇT parametre optimizasyonunda kullanılacak giriş matrisinin nasıl oluşturulduğu özetlenmektedir. Başlangıçta değişik L ve Rg parametre değerleri için bir L ve Rg kümesi oluşturulmuştur. Giriş matrisi için farklı vektörler oluşturmak için gerekli L ve Rg değerleri L ve Rg kümesinden alınmıştır. Algoritmanın diğer iterasyonlarında bu L ve Rg matrisi güncellenerek yeni vektörlerin oluşturulmasında kullanılmıştır.



Şekil 10. Giriş Matrisi Oluşturma

Figure 10. Generating of the Input Matrix

Optimizasyon algoritmasında giriş matrisi oluşturulduktan sonra kılıf gerilimi tahmin edilmektedir. Kılıf geriliminin tahminin eğitilmiş DVR yöntemi ile nasıl yapıldığı da Şekil 11'de özetlenmiştir.



Şekil 11. Kılıf gerilim tahmini

Figure 11. Forecasting of The the sheath voltage

Şekil 9'da gösterilen algoritmadan da anlaşılacağı üzere giriş matrisini oluşturmak için rasgele bir L ve Rg kümesi oluşturulur. Öncelikle farklı vektörler ile giriş matrisi oluşturulur. Daha sonra giriş matrisinde bulunan her bir vektör için daha önce eğitilmiş olan DVR yöntemi ile kılıf gerilimi tahmin edilir. Vektörler içinden kılıf gerilimi dokunma geriliminden yüksek olanlar elenir. Kalan vektörlerin kılıf

gerilimleri sıralanır ve bunlar içinden kılıf gerilimi dokunma gerilimine en yakın olan vektör o iterasyon için iyi vektör olarak seçilerek iyi vektörler kümesine alınır. Böylece bir iterasyon tamamlanmış olur. Yani her iterasyon sonunda 1 tane vektör iyi vektör olarak seçilerek iyi vektörler kümesine gönderilir.

Eğer belirlenen iterasyon sayısına ulaşılmadı ise L ve Rg vektör kümesi belirlenen optimizasyon yöntemi ile yeniden güncellenir ve yeni iterasyon için giriş matrisi yeniden oluşturularak algoritmadaki adımlar izlenir. Yeni iterasyon için L ve Rg kümesini optimizasyon yöntemi ile güncelleme işleminde L ve Rg değerleri kendileri için belirlenen sınır değerler içinde yeni değerler alırlar ve bu da ait oldukları vektörün kılıf gerilimi değerlerine göre yapılır. Kılıf gerilimi değeri iyi olan vektörlerde çok değişiklik yapılmazken, kılıf gerilimi değerleri iyi olmayan vektörler de köklü değişiklikler yapılır. L ve Rg kümesinin güncellenmesi için kullanılan optimizasyon yöntemleri olarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), İntertia Ağırlıklı Parçacık Sürü Optimizasyonu (iPSO), Çekimsel Arama Algoritması (CAA) ve Genetik Algoritma (GA) kullanılmıştır. Her optimizasyon yönteminin algoritması farklı olduğu için optimum L ve Rg değerlerinin belirlenmesi de optimizasyon algoritmasına göre farklılık göstermektedir. Bu değerler Sonuç ve Tartışmalar bölümünde daha açık görülmektedir.

Her iterasyon sonunda bir tane iyi vektör seçilerek iyi vektör kümesi maksimum iterasyon sonunda tamamlanır. Örneğin iterasyon sayısı 100 ise iyi vektör kümesinde 100 tane seçilmiş iyi vektör bulunmaktadır. Belirlenen iterasyon sayısı tamamlandıktan sonra iyi vektörler kümesindeki vektörler kılıf gerilimlerine göre sıralanırlar. İyi vektörler kümesi içinde kılıf gerilimi dokunma gerilimine en yakın olan vektör en iyi vektör olarak seçilir. Seçilen en iyi vektördeki L ve Rg değerleri PCT yöntemi için en uygun değerlerdir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu bölümde öncelikle PCT yönteminin optimizasyonunda amaç fonksiyonu olarak kullanılacak olan DVR yönteminin seçimi yapılmıştır. DVR yönteminin seçiminde eğitim hatalarından yararlanılmıştır. Daha sonra optimizasyon algoritması kullanılarak 4 optimizasyon yöntemiyle en uygun L ve Rg değerleri belirlenmiştir. Bu belirlenen L ve Rg değerleri PSCAD /EMTDC programında oluşturulan hat parametrelerinde yerine koyularak benzetim çalışmaları yapılmıştır. En son olarak optimizasyonu yapılmış PCT yöntemleri ile çift taraflı topraklama yöntemlerinin 1 km uzunluğundaki hat için yapılan benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

Öncelikle PSCAD/METDC benzetim programında 61 ayrı yüksek gerilim yeraltı kablolu hat çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar ile Materyal ve Yöntem bölümünde belirtilen DVR yöntemleri eğitilmiştir. Eğitim için 61x13 eğitim matrisi kullanılmıştır. Bu matrisin bir bölümü Çizelge 1'de gösterilmektedir. Eğitim işlemi sonunda belirtilen yöntemlerin eğitim hataları da Çizelge 2'de gösterilmektedir. Çizelge 2'den de görüleceği üzere CDVR yönteminin eğitim hataları diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Dolayısıyla optimizasyon algoritmasında eğitilmiş DVR yöntemi olarak CDVR yöntemi kullanılmıştır.

Çizelge 1. Eğitim parametrelerinin bazıları

Table 1. Some training parameters

Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Is (A)	Vs (V)	THBIb (%)	THBIc (%)	Ika (A)	Ikb (A)	Ikc (A)	L (m)	Rg (ohm)	Vk (V)
522	612	567	1.67	8.35	3.92	3.95	204	258	213	250	5	70
510	702	499	1.24	6.18	3.92	3.95	201	264	221	250	5	68
524	618	567	1.8	8.99	4.72	4.76	206	259	213	250	5	70
512	702	502	1.29	6.44	4.72	4.76	203	264	225	250	5	68
527	620	567	1.92	9.62	5.52	5.57	208	260	213	250	5	70
513	702	506	1.31	6.56	5.52	5.57	204	264	228	250	5	69
533	622	567	2.18	10.91	7	7.06	212	261	213	250	5	70
514	702	508	1.34	6.69	7	7.06	204	264	234	250	5	69

Çizelge 2. Tahmin Yöntemlerinin Eğitim Hataları*Table 2. Training Errors of The forecasting Methods*

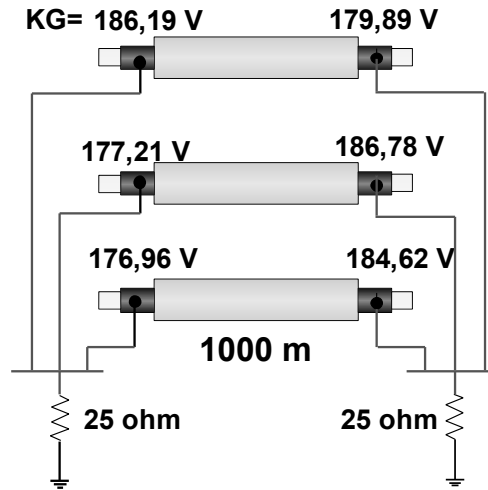
DVR Yöntemi	Eğitim Hataları			
	KOK	R-KH	OKH	MOH
LDVR	1,0942	0,97	1,1973	0,7702
QDVR	1,1470	0,97	1,3155	0,8390
CDVR	0,9831	0,98	0,9664	0,8190
FGDVR	4,6387	0,48	21,518	4,3242
MGDVR	1,7043	0,93	2,9048	1,2657
CoDVR	3,6518	0,68	13,336	2,9522

CDVR yönteminin eğitim işlemleri tamamlandıktan sonra PÇT yöntemi için en uygun devre parametreleri tespit edilerek bir yüksek gerilim kablolu hattın topraklaması için benzetimler yapılmıştır. Benzetimi yapılan hat Şekil 7'de gösterilen radyal bir şebekede bulunup hat gerilimi 31,5 kV'dur. Radyal şebeke için yapılan topraklama çalışmalarında 1. YG kablo hattı dikkate alınmıştır. Çünkü en yüksek akım hattın bu parçasından akmaktadır. Dolayısıyla kılıf gerilimi de en yüksek bu parçada olacaktır. 1. YG kablo hattının uzunluğu 1 km olmakla birlikte, hattın topraklanması için çift taraflı topraklama yöntemi ve optimize edilmiş PÇT yöntemleri ayrı ayrı denenerek iki yöntemin sonuçları karşılaştırılmıştır. Hatta her faz için 1x 240mm² kesitli XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu kullanılmış ve hattın toprak altında bir yeraltı kablosu kanalında gittiği düşünülmüştür. Hattan akan faz akımları 415,64 A, 378,35 A ve 442,511 A şeklindedir. Bu akımlar kablonun akım taşıma kapasitesini geçmemekte ve sistemde en büyük sorunlardan olan dengesiz yüklenme durumuna da uymaktadır. Benzetim çalışmalarına geçmeden önce kılıf geriliminin dokunma gerilimini aşmayacak ve parça sayısı da en az olacak şekilde en uygun L ve Rg değerleri optimizasyon yöntemleri ile belirlenmiştir. Çizelge 3'de optimizasyon yöntemlerine göre belirlenen PÇT için optimum L, Rg değerleri gösterilmektedir. Rg'nin en düşük değeri 1 ohm, en yüksek değeri ise 25 ohm'dur. Optimizasyon yöntemlerinde popülasyon sayısı 61 ve iterasyon sayısı 100 olarak belirlenmiştir.

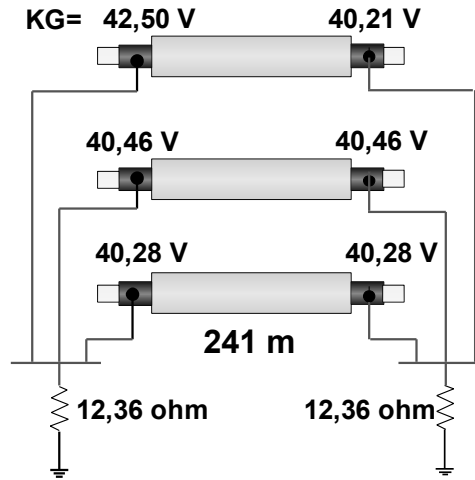
Çizelge 3. Her bir hat parçası için optimum L ve Rg değerleri*Table 3. Optimum L and Rg values for each minor part*

Optimizasyon Yöntemi	L (m)	Rg (ohm)
PSO	241	12,36
iPSO	247	3,56
GA	244	11,37
GSA	250	12,81

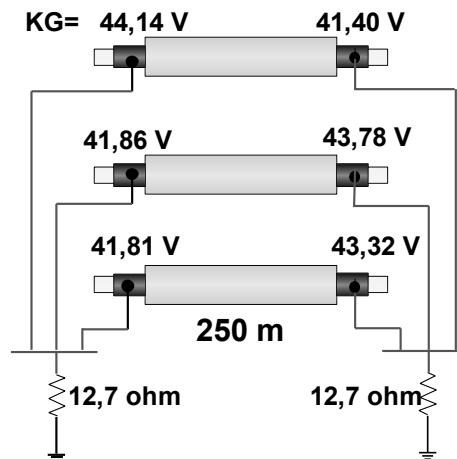
Belirlenen değerlere göre yüksek gerilim kablolu hattın topraklaması PÇT yöntemine göre PSCAD/EMTDC benzetim programında kurulmuş ve hattın benzetimleri yapılmıştır. Öncelikle 1. YG kablo hattı için çift taraflı topraklama yöntemi uygulanmış ve sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir.



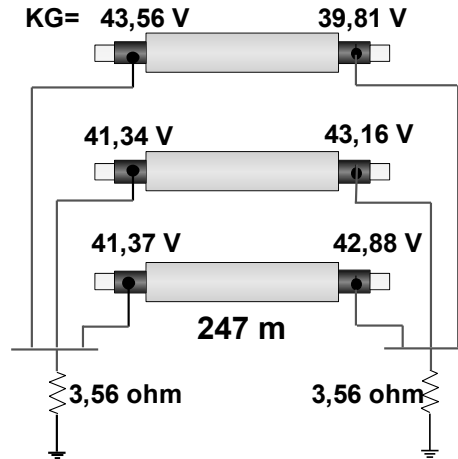
Şekil 12. Çift taraflı topraklama sonucu
Figure 12. The solid bonding



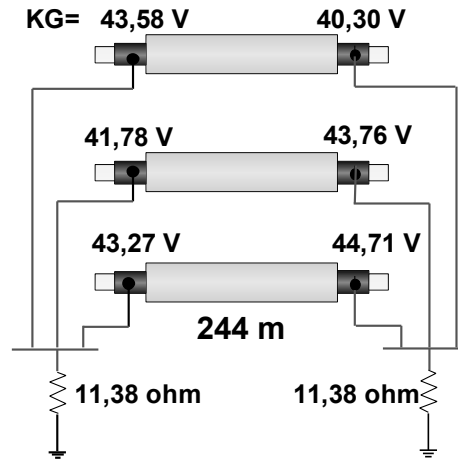
Şekil 13. PSO ile PÇT sonucu
Figure 13. SSB with PSO result



Şekil 14. ÇAA ile PÇT sonucu
Figure 14. SSB with GSA result



Şekil 15. iPSO ile PÇT (SSB wit iPSO)
Figure 15. SSB wit iPSO result



Şekil 16. GA ile PÇT (SSB with GA)
Figure 16. SSB with GA result

Şekil 12’de gösterilen çift taraflı topraklama yöntemi ile Şekil 13, 14, 15 ve 16’da gösterilen optimize edilmiş PÇT yöntemleri 1. YG hattına uygulanmıştır. PÇT yöntemlerinde 1 km uzunluğundaki hat 4 parçaya ayrılmış ve sadece 1 parçasının benzetim sonuçları gösterilmiştir. Çünkü diğer 3 parçanın da sonuçları benzerdir.

Benzetim sonuçlarına bakıldığında CDVR ve optimizasyon yöntemleri kullanılarak tasarlanan PÇT yöntemi ile yapılan topraklamalarda kılıf gerilimleri dokunma geriliminin altında kalırken, literatürde önerilen yöntemlerden olan çift taraflı topraklama yöntemi ile yapılan topraklamada kılıf gerilimleri dokunma geriliminin çok üzerindedir. Yani günümüz şebeke koşullarında regresyon tabanlı optimize edilmiş PÇT yöntemleri ile radyal şebekelerdeki yüksek gerilim yeraltı kablolarının topraklaması hem kablo başlığı arızalarını hem de elektrik çarplıma riskini önlemede etkili yöntemlerdir. Dolayısıyla bu çalışma sonuçları literatüre de bu yönden katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Akbal, B., 2018, “Applications of artificial intelligence and hybrid neural network methods with new bonding method to prevent electroshock risk and insulation faults in high-voltage underground cable lines”, *Neural Comput & Applic*, Cilt: 24, Sayı: 2, ss. 32-36
- Alex J. S., Bernhard, S., 2004, “A tutorial on support vector regression” *Statistics and Computing*, Cilt: 14, ss. 199-222

- Bak, C., L., Silva, F., F. 2016. "High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 1." *Electric Power Systems Research*, Cilt: 140, ss. 984-994
- Bak, C., L., Silva, F., F. 2016. "High voltage AC underground cable systems for power transmission – A review of the Danish experience, part 2." *Electric Power Systems Research*, Cilt: 140, ss. 995-1004
- Benato, R., Balanuye, I., Köksal, F., Ozan, N., Özdemirci, E. 2017. "A 4 GW AC submarine Turkish power grid reinforcement under the Dardanelles Strait", *IEEE 2017 AEIT International Annual Conference*, Cagliari, Italy ss. 1-6.
- Bessissa, L., Boukezzi, L., Mahi, D. 2016. "Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging." *Fuzzy Information and Engineering*, Cilt: 8, Sayı:1, ss. 101-112
- Bessissa, L., Boukezzi, L., Mahi, D. 2016. "Influence of Fuzzy Parameters on the Modeling Quality of XLPE Insulation Properties under Thermal Aging." *Fuzzy Information and Engineering*, Cilt: 8, Sayı:1, ss. 101-112
- Czapp, S., Dobrzynski, K., Klucznik, J., 2014, "Calculation of induced sheath voltages in power cables – single circuit system versus double circuit system" *Journal of Information, Control and Management Systems*, Cilt: 12, ss. 113–123
- Gatta F. M., Lauria S., Luigi C. 2005. "Very long EHV cables and mixed overhead-cable lines. Steady-state operation." *IEEE Russia Power Tech*, ss. 1-7.
- Gouramanis, K., V., Kaloudas, C., G., Papadopoulos, T., A., 2011, "Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables," *IEEE Trondheim Power Tech*, Norway, ss. 1–7
- Jiali D., Xin W., Yihui Z., Lixue L. 2019. "A Novel Fault Location Algorithm for Mixed Overhead-Cable Transmission System Using Unsynchronized Current Data." *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Cilt: 14, ss. 1295-1303.
- Jiangchao, Q., Maryam, S., 2015, "A Zero-Sequence Voltage Injection-Based Control Strategy for a Parallel Hybrid Modular Multilevel HVDC Converter System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt: 30, Sayı: 2, ss. 728 – 736
- Jittiphong K., Atthapol N. 2017. "Fault Classification on the Hybrid Transmission Line System between Overhead Line and Underground Cable." *17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS)*, ss. 1-6.
- Jung, C., K., Lee, J., B., Kang, J., W., 2007, "Sheath circulating current analysis of a cross-bonded power cable systems" *J Electr Eng & Technol*, Cilt: 2, ss. 320–328.
- Jung, C., K., Lee, J., B., Kang, J., W., 2005, "Sheath current characteristic and its reduction on underground power cable systems" *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, CA, USA, ss. 2562–2569
- Marina, A., S., Abderrahim K., Fernando G., et al.: 'Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents', *IEEE Transactions On Power Delivery*, DOI 10.1109/TPWRD.2019.2903329.
- Mehdi, N., Gerry, M., 2014, "Three-Phase Multi module VSIs Using SHE-PWM to Reduce Zero-Sequence Circulating Current", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 61, Sayı: 4, ss. 1659 – 1668
- Ruiz, J., R., Garcia, A., Morera, X., A. 2007. "Circulating sheath currents in flat formation underground power lines." *2007 International Conf. Renewable Energies and Power Quality*, Mart, ss. 1–5.
- Sachin K. G., Arun P., 2016, "Study on Semi Conductive Layer during EHV XLPE Cable Joint Procedure" *International Journal of Novel Research in Engineering and Science*, Cilt: 3, Sayı: 1, ss. 8-11
- Shuai Z., Houlei G., Yingtao S. 2016. "A New Fault-Location Algorithm for Extra-High-Voltage Mixed Lines Based on Phase Characteristics of the Hyperbolic Tangent Function." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Cilt: 31, Sayı: 3, ss. 1203-1212.
- Tziouvaras A. D. 2006. "Protection of high-voltage AC cables", *59th Annual Conf. for Protective Relay Engineers*, TX, USA ss. 48–61.

- Xiang D., Yang Y., Chengke Z., Donald M. H., 2017, "Online Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents", IEEE Transactions On Power Delivery, Cilt: 32, Sayı: 5, ss. 2281-2290.
- Yunus, B. 2016. "Trend adjusted lifetime monitoring of underground power cable". Electric Power Systems Research, Cilt: 143, ss. 189-196
- Zhangping, S., Xing, Z., Fusheng, W., 2015, "Modeling and Elimination of Zero-Sequence Circulating Currents in Parallel Three-Level T-Type Grid-Connected Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Cilt: 30, Sayı: 2, ss. 1050 – 1063
- Zhonglei, L., Du, B., X., Wang, L., 2012, "The calculation of circulating current for the single-core cables in smart grid", 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia, China, Mayıs, ss. 1–4.



DÜNYADA KARSTİK JEOPARK TURİZMİ VE JEOPARK ÖNERİ ALANI: KARAPINAR (KONYA-TÜRKİYE)

¹Alican ÖZTÜRK , ²Bilgehan Yabgu HORASAN 

¹ Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE

² Selçuk Üniversitesi, Sarayönü MYO, Çevre Koruma Teknolojileri, Sarayönü/Konya, TÜRKİYE

¹aozturk@ktun.edu.tr, ²byhorasan@selcuk.edu.tr

(Geliş/Received: 21.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.07.2020)

ÖZ: Jeopark kavramının temelleri Dünya da ilk olarak 17. Yüzyıla kadar dayanmaktadır. Ülkemiz ise jeopark kavramı ile 1970 yıllarında tanışmıştır. Oluşumu milyonlarca yıl alabilen jeolojik yapıların korunması ve sonraki nesillere aktarılması, hızla küreselleşen Dünyada önem kazanmıştır. Özellikle doğa turizmine meraklı insanların ilgisini çeken, özel jeolojik yapıları görmek ve gezmek isteyen insanların artan ilgisi nedeni ile jeopark turizmi Dünyada yaygınlaşmıştır. UNESCO listesinde Dünyada 147 adet jeopark mevcut olup, ülkemizde ise bu listeye girmeye hak kazanan Kula jeopark alanı bulunmaktadır. Karstik alanların jeoturizmde cezbedicili yanında, insanların karst yapılarına olan ilgileri, karstik yapıların meydana getirdiği jeopark alanlarının önemini artırmaktadır. Karapınar potansiyel jeopark alanı, Orta Anadolu'da, Konya idari sınırları içerisinde ve merkeze yaklaşık 100 km uzaklıktadır. Karapınar ilçe merkezinin hemen doğusunda, yaklaşık 1500 km² lik bir alanı kapsayan jeolojik miras alanı, bu alan etrafındaki jeositler, arkeolojik ve kültürel sit alanları olarak değerlendirilmektedir. Bölgede, muhtelif boy ve ebatlarda, sulu veya susuz 20 den fazla sayıda obruk bulunmaktadır. Jeopark öneri alanında bulunan, halk arasında nazar boncuğu olarak ta adlandırılan Meke gölü, Karapınar- Ereğli yolu üzerinde yaklaşık 7. km'de, ana asfaltın yaklaşık 1.5 km kuzey batısında kalmaktadır. Jeolojik terim kavramıyla Meke Maarı olarak tanımlanan Meke Gölü, Pleyistosen'den itibaren iki aşamalı volkanik aktivite ile sönmüş bir volkan kraterinin suyla dolmasıyla oluşan ve ortasında adacıklar bulunan bir krater gölüdür. Diğer bir göl olan Acıgöl ise, Karapınar Ereğli yolu üzerinde 5. Kilometrede gözlenen ve anayolla yaklaşık 500 metre mesafede yer alan sığ krater gölü görünümündeki maar, volkan patlamasıyla meydana gelmiş çukurdan ibarettir.

Anahtar Kelimeler: Jeopark, Jeosit, Karst, Obruk, Karapınar, Meke

Carstic Geopark Tourism In The World And Geopark Suggestion Area: Karapınar (Konya-Turkey)

ABSTRACT: The concept of the geopark, the basics in the world first dates back to the 17th century. Our country met with the concept of geopark in 1970. The preservation of the geological structures that can take millions of years to form and transferring them to the next generations has gained importance in the rapidly globalizing world. Especially due to the increasing interest of the people who want to visit the special geological structures that attract people's interested in tourism, geopark tourism has become widespread in the world. There are 140 geoparks in the world on the list of UNESCO. In our country, there is a Geopark area in Kula which is entitled to enter this list. The Geoparks, where the karst areas have an attractive side in geo-tourism, attract people's interest in karst structures and are composed of karst structures that draw attention. The potential geopark area of Karapınar is located in the central region of Central Anatolia, approximately 100 km from the city center of Konya. Just east of

the district center of Karapınar, covering an area of approximately 1500 km², the geological heritage geocites around this area are considered as archaeological and cultural sites. In the region, there are more than twenty watery or waterless sinkholes of various dimensions and sizes. Lake Meke, which is also known as an evil eye bead in the geopark suggestion area, is located on Karapınar-Ereğli road at approximately 7 km, about 1.5 km northwest of the main asphalt. Meke Lake, which is defined as Meke Cave with the concept of the geological term, is a crater lake formed by the filling of a volcano crater with a two-stage volcanic activity since Pleistocene and with islets in the middle. Acıgöl, another lake, is a shallow crater lake, which is observed at the 5th kilometer on the Karapınar Ereğli road and is located approximately 500 meters from the main road, and consists of a pit formed by a volcano eruption.

Key Words: Geopark, Geosite, Karst, Sinkhole, Karapınar, Meke.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yer kürenin oluşumundan günümüze kadar olan jeodinamik süreçler nedeniyle üzerinde yaşadığımız yer kabuğu, kendi içinde sürekli değişen, bu yönüyle de yaşayan bir ekosistem olarak tanımlanabilir. İnsanoğlu, milyarlarca yıl süren yer kürenin oluşum sürecinin çok az bir kısmında mevcut olup gelişimini tamamlayıp, toplumsallaştıktan sonra sanayi ve bilgi toplumuna geçiş yapmıştır. İlerleyen yıllarda insanoğlu, geçmişe ilgi duymuş ve arkeoloji, antropoloji ve paleontoloji gibi bilim dalları yardımıyla, doğanın ve kendisinin geçmişini araştırma çalışmalarına başlamıştır (Çiftçi ve Güngör, 2016). Hızla gelişen sanayi için gerekli olan insan gücü kırsal alanlardan şehirlere göç ederek şehirlerin ani gelişimine sebep olmuş (Horasan, 2014) ve her geçen gün artan hammadde tüketimi için de doğa da var olan madenler, endüstriyel ham maddeler ve doğal taşlara olan talepleri karşılamak nedeniyle kontrolsüz bir şekilde üretim yapmıştır. Plansız, programsız ve düzensizce gerçekleştirilen bu olaylar doğal kaynakların ve jeolojik yapıların yok olmasına sebep olmaktadır. Tüm bu milyonlarca-milyarlarca yılda oluşagelen doğal jeolojik yapıların, korunmadığı ve bu jeolojik yapılara gerekli özen gösterilmediği sürece çok hızlı bir şekilde tüketilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır (Çiftçi ve Güngör, 2016). Dünyada ilk olarak jeolojik miras koruma çalışmaları 1750'li yıllarda Fransa'daki Baumann mağarası ve İrlanda'da bulunan Giant Causeway koruma çalışmaları ile başlamıştır (Burek ve Prosser, 2008; Dougherty, 2008; Erikstad, 2008). 1950'li yıllarda başlayan koruma çalışmaları sonrasında; 1872'de USA'daki Yellowstone bölgesi "Milli Park" olarak ilan edilmiş ve özel koruma statüsü oluşturulmuştur.

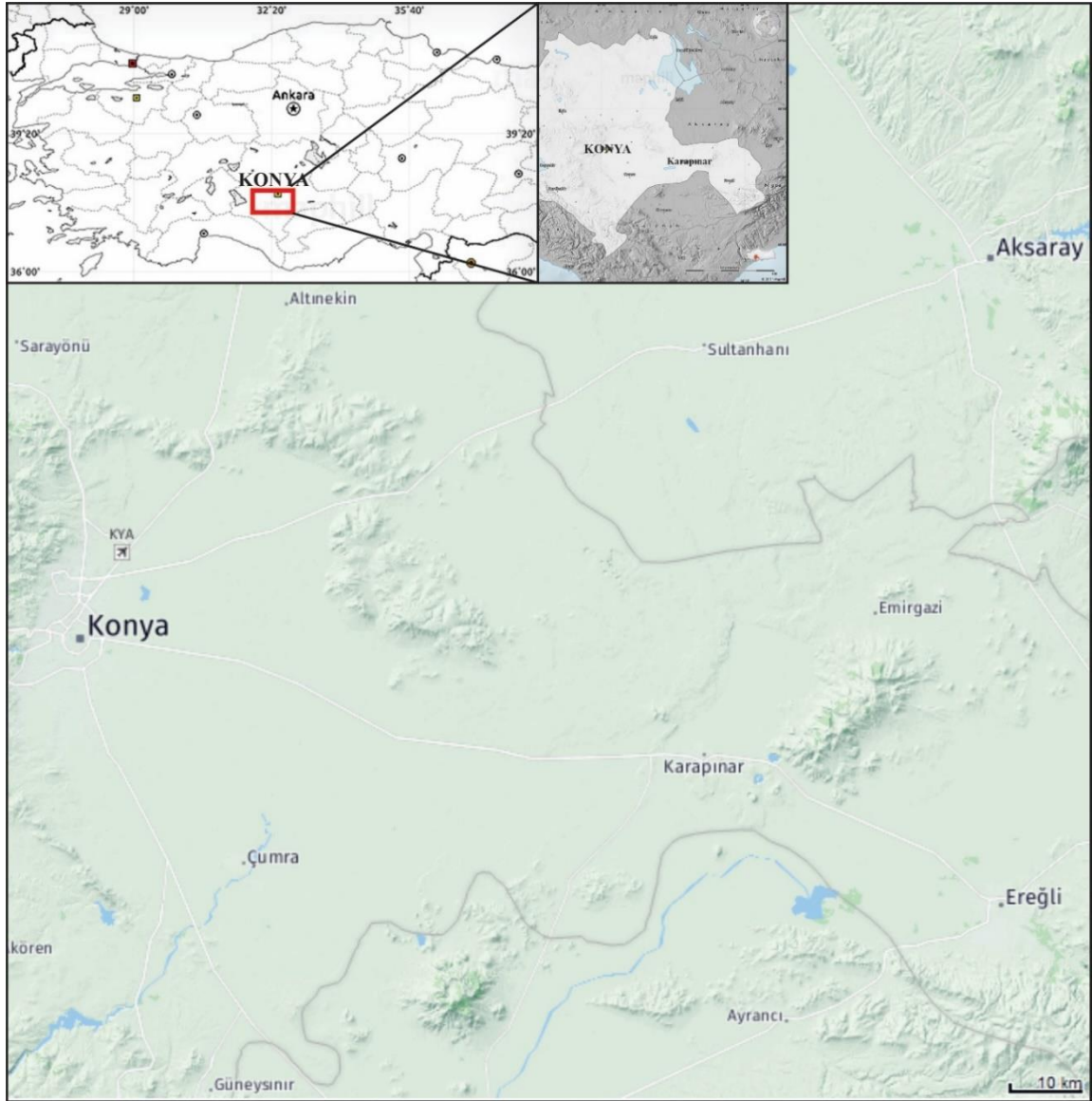
1972 yılında UNESCO tarafından "Dünya Kültür ve Doğa Mirası"nı tespit etmek ve korumak üzere "Dünya Mirası Komitesi" kurulmuştur (Zouros, 2003). Bu komite yeryüzünde öne çıkan üstün evrensel kıymete sahip alanların özelliklerini tespit etmek ve hangilerinin Dünya Mirası Listesine alınacağına karar vermek amacı doğrultusunda işlevini sürdürmüştür. Seçim kriterleri konusunda titiz davranılması nedeni ile Dünya Mirası Listesine ancak 690 alan dahil edilmiştir. Bunlardan 20'si jeolojik önemi nedeni ile (Büyük Kanyon, Havai Volkanları, Büyük Mercan resifleri vb.) Dünya Mirası Listesine kabul edilmiştir (Zouros, 2003; Kandemir ve Köroğlu, 2017).

Grand Canyon ve Karlsbad mağaraları bu listeye eklenmiş olsa da (Kazancı, 2001), yasal bir çerçeveye içine alınamaması, yaygın bir koruma bilincinin henüz gelişmemiş olması ve sanayileşmenin ihtiyacı olan kaynak, ham madde temininde engel olabileceği nedeniyle hedefine ulaşamadığı Çiftçi ve Güngör, 2016 tarafından belirtilmektedir. Dünyada jeolojik miras konusunda pek çok girişimlerin bulunmasının yanında (Barettino vd., 1999 a, b; Wimbledon vd., 1995; Wimbledon, 1996; Sol ve Ünder, 1999), UNESCO 2002 yılında jeolojik miras koruma kavramının sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde nasıl uygulanacağına dair kendi yönergelerini oluşturmuş ve Uluslararası Jeopark Ağı'nı kurmuştur (GG, 2015; GGN, 2015).

Türkiye'de 70'li yıllarda ilk defa jeolojik miras kavramı ve korunması konusundaki çalışmalar, "Türkiye'de önemli jeolojik aflörmanların korunması" (Ketin, 1970) ve "Jeoloji mostralarna saygı"

(Canik, 1972) yayınları ile başlamıştır. Sonrasında, özel jeolojik oluşumlarından, mağaralar (Güldalı,1972; Şenol ve Şenol, 1978; Güldalı vd., 1981; 1983 Atalay, 1982), insan ayağı fosilleri (Arpat,1976; Tekkaya, 1976), lagünel göller (Gedik, 1977), göktaşı çukuru (Arpat ve Yılmaz, 1976), çağlayanlar (Ulakoğlu, 1978), buzul gölleri (Perinçek, 1979) ve obruklar (Güldalı ve Şaroğlu, 1983) gibi, jeolojik miraslar hakkında önemli çalışmalar yürütülmüştür. 1976 yılında ise “Doğal anıtların korunmasında yasal dayanaklar” isimli çalışma (Öngür, 1976) ülkemizdeki doğal anıtların korunmasına yönelik yasal mevzuatları işaret etmektedir.

MTA Genel Müdürlüğü bünyesinde sürdürülen “Türkiye'nin Jeolojik Miras Alanları ve Bu Alanların Koruma Kullanım Kriterlerinin Belirlenmesi Projesi” kapsamında çalışılan, Konya Karapınar Bölgesi (Şekil 1), Mut Miyosen Havzası'ndan sonra, Türkiye'nin ikinci Öneri Jeopark Alanı olarak değerlendirilmiştir (Gonca ve Erol, 2007) . Bu çalışma; dünyadaki karstik oluşumların jeoturizm üzerindeki etkilerinin ortaya konulması, Karapınar (Konya-Türkiye) jeopark öneri alanı ile karşılaştırılarak turizm potansiyelinin artırılması, jeolojik mirasın önemi ve korunması açısından farkındalık oluşturmak için hazırlanmıştır.



Şekil 1. Karapınar (Konya-Türkiye) bölgesinin yerbulduru haritası..

Figure 1. Location map of the Karapınar (Konya-Turkey) area.

JEOPARKLAR (GEOPARKS)

En az birkaç jeosit olmak üzere diğer doğal ve kültürel miras değerlerini de barındıran, müzesi ve yönetim merkezi bulunan, büyük ölçekli alanlara Jeopark adı verilir. Jeopark alanı, başta jeolojik miras niteliğindeki öğeler olmak üzere tüm doğal ve kültürel mirasın korunmaya alındığı, aynı zamanda sosyoekonomik kalkınmanın da amaçlandığı bir kültürel düzenlemedir (Çiftçi ve Güngör, 2016). Dünyada toplam, 147 adet jeopark bulunmaktadır (UGG, 2019). En çok 39 adet jeopark ile Çin birinci sırada yer almaktadır. Ülkemizde ise Kula jeoparkı UNESCO listesine girmiştir. Son yıllarda, özellikle artan havayolu şirketleri sayısı kaynaklı rekabetten dolayı bu şirketlerin uçuş maliyetlerini düşürmesi akabinde uluslararası turist sayısında daha da artış gözlenmiştir. Bu olay benzersiz jeolojik alan ve mirasa sahip olan bölgelerin doğa turizmine meraklı insanlar için kolay erişimini sağlamış ve jeoturizm için daha cezbedici hale getirmiştir (Cságoly, ve diğ. 2016; Tverijonaite, ve diğ., 2018; Haraldsson, ve diğ.2018). Kentleşmenin en büyük problemlerinden biri olan kalabalık ve gürültülü ortamlardan, daha sakin doğal ortamlara gitme isteği, yabancı ve yerli insanların ilgisini çekebilecek yerler olarak jeolojik ve jeomorfolojik özelliklere odaklanan jeoturizm, son on yılda turizm alanında en hızlı büyüyen pazar olmuştur (Ólafsdóttir, ve diğ; 2014; Ólafsdóttir ve diğ., 2018; Dowling, ve diğ., 2018).

Karstik oluşumların jeoturizme açılması ile bu bölgelerin daha az zarar görmesini, bilimsel ve özel konularda çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Ayrıca bu bölgelerin jeolojik oluşumları önem arz etmekte ve jeoloji ile kültürel turizm arasında bağlantıyı oluşturmaktadır. Karst, jeoparklar için turizm açısından önemli bir kaynak iken doğa turizmi tutkunları için özel ve çok ilginç oluşumlardır. Bu nedenle, karst oluşumları turizm faaliyetlerinin geliştirilmesinde ve ekonomik kârın yaratılmasında kullanılabilir. Karst oluşumları tamamen karst tabanlı jeoparklar, kısmen karst tabanlı jeoparklar ve nadiren karst içeren jeoparklar olarak üç kategoride sınıflandırılabilir (Ruban, 2018) (Çizelge 1) (Şekil 2).



Şekil 2. Karst ile ilgili jeoparkların dünyadaki dağılımı (Ruban, 2018).

Figure 2. Distribution of karst related geoparks in the World (Ruban, 2018).

Çizelge 1. UNESCO Küresel Jeoparklarındaki Karst kaynağı (sadece karst özellikli jeoparklar listelenmiştir.) (Ruban, 2018).

Table 1. Karst source in UNESCO Global Geoparks (only karst featured geoparks are listed, Ruban, 2018).

Jeopark	Ülke	Karst Kaynağı		
		Tamamen Karst Tabanlı Jeopark	Kısmen Karst Tabanlı Jeopark	Nadiren Karst İçeren Jeoparklar
Styrian Eisenwurzen	Avusturya		+	
Famenne-Ardenne	Belçika		+	
Xingwen	Çin	+		
Yandangshan	Çin			+
Fangshan	Çin		+	
Funiushan	Çin		+	
Leye Fengshan	Çin	+		
Shennongjia	Çin			+
Yanqing	Çin		+	
Dunhuang	Çin			+
Zhijindong Cave	Çin	+		
Guangwushan-Nuoshuihe	Çin		+	
Zhangjiajie	Çin			+
Shilin	Çin	+		
Danxiashan	Çin			+
Papuk	Hırvatistan		+	
Bohemian Paradise	Çek Cumhuriyeti			+
Massif des Bauges	Fransa			+
Causses du Quercy	Fransa	+		
Harz, Braunschweiger Land	Almanya			+
Swabian Alb	Almanya		+	
Sitia	Yunanistan		+	
Vikos-Aoos	Yunanistan			+
Chelmos Vouraikos	Yunanistan		+	
Psiloritis	Yunanistan			+
Lesvos Island	Yunanistan			+
Novohrad-Nygrad	Macaristan ve Slovakya			+
Gunung Sewu	Endonezya	+		
Qeshm Island	İran			+
Burren & Cliffs of Moher	İrlanda		+	
Marble Arch Caves	İrlanda & Büyük Britanya		+	
Adamello-Brenta	İtalya			+
Alpi Apuani	İtalya		+	
Beigua	İtalya			+
Madonie	İtalya		+	
San'in Kaigan	Japonya		+	
Mudeungsan	Kore Cumhuriyeti			+
Jeju Island	Kore Cumhuriyeti			+
Langkawi	Malezya		+	
Magma	Norveç			+

Çizelge 1. Devamı
Table 1. continuation

Jeopark	Ülke	Karst Kaynağı		
		Tamamen Karst Tabanlı Jeopark	Kısmen Karst Tabanlı Jeopark	Nadiren Karst İçeren Jeoparklar
Sierra Norte de Sevilla	İspanya			+
Villuercas Ibores Jara	İspanya			+
Central Catalonia	İspanya			+
Las Loras	İspanya			+
Basque Coast	İspanya		+	
Sobrarbe-Pirineos	İspanya		+	
Sierras Subbeticas	İspanya		+	
Satun	Tayland			+
Fforest Fawr	Büyük Britanya			+
English Riviera	Büyük Britanya		+	
Dong Van Karst Plateau	Vietnam		+	
Non Nuoc Cao Bang	Vietnam		+	

Tamamen karst tabanlı jeopark niteliğinde olan, Güneybatı Çin'in Guangxi Zhuang Özerk Bölgesi'nde bulunan Leye Fengshan UNESCO Global jeoparkı'nın kapsadığı alandaki kayaçların %60'şu sedimanter birimlerden oluşmaktadır. Leye ve Fengshan ilçelerinin karst alanlarında iki büyük yeraltı nehrinin gelişimini, Bailang ve Poyue'yi kontrol eden "S" şeklinde bir yapı ve eşkenar dörtgen bir konfigürasyon oluşturmuştur. Ayrıca, bu iki yeraltı nehri arasında Buliuhe Nehri bulunmaktadır. Bu nehirlerin çevresinde, yüksek karstik tepe kümeleri (fengcong), polye, karstik kaynaklar, karstik pencereler (tiankengs), doğal köprüler, geniş mağaralar, büyük mağara odaları ve speleothemleri içeren sayısız karst jeosit alanları bulunmaktadır. Nehirlerin çevresinde yer alan jeosit alanlarında aynı zamanda fay zonları, küçük kıvrımlar, dev panda fosilleri, Neojen stratigrafik kesit ve diğer fosiller de gözlenmektedir. Bu bölge dünyanın en güzel karst pencerelerini, tiankengs yoğunluğunu ve dünyada bilinen en büyük mağara odalarını ve dünyanın en uzun doğal köprülerini de içeren jeopark alanıdır (LUGG, 2019).

Tayland'ın güneyindeki Satun eyaletinde yer alan Satun UNESCO Global Jeoparkı, iki milli park ve bir vahşi yaşam koruma alanı dahil olmak üzere dört bölgeyi (Thungwa, La-ngu, Manang ve Mueang Satun'un bir parçası) kapsamaktadır (SUGG,2019). Satun Geopark, Paleozoik Dönem'den kalma çok çeşitli fosillerin yanı sıra karst topoğrafyasına sahiptir. Trilobitler, brakilopodlar, stromatolitler, kondanterler, graptolitler, tentaculitler ve nautiloidler dahil olmak üzere organizmaların ortaya çıktığı ,500 milyon yıldan daha eski jeolojik yapı ve unsurların kanıtına dair oluşumlar mevcuttur. Jeopark, Tayland'daki en büyük mağara olan Phu Pha Phet mağarasına da ev sahipliği yapmaktadır (BUGG, 2019).

Ngorongoro Lengai UNESCO global jeoparkı Kuzey Tanzanya'da (Doğu Afrika) yer almaktadır. Jeopark, Arusha bölgesindeki Ngorongoro, Karatu ve Monduli bölgelerini kapsamaktadır. Bölge Kuzey ve Kuzey-Batı'da Serengeti Ulusal Parkı, Doğusunda Natron Gölü, Güney'de Büyük Rift Vadisi'nin sol kolu ve Batıya Maswa Oyun Rezervi ile sınırlıdır. Bölgede rakımın en düşük olduğu ana Krater (600 m) ile en yüksek nokta olan, Oldonyo Lengai (2,962 m) arasında değişim göstermektedir (NUGG, 2019). Ngorongoro Lengai UNESCO global jeoparkı içerisinde yer alan Ngorongoro kalderası dünyanın en büyük bozulmamış volkanik kalderalarından biridir. Patlama bu alanda sadece 3 milyon yıl önce Pliosen'de oluşmaya başladı ve yaklaşık 250 bin yıl boyunca aktif kaldı (Zaba ve Gaidzzik,2011).

Karapınar potansiyel jeopark alanı, Orta Anadolu'da, Konya idari sınırları içerisinde ve merkeze yaklaşık 100 km uzaklıktadır . Karapınar ilçe merkezinin hemen doğusunda yer alan, yaklaşık 1500

km² lik bir jeolojik miras alanını kapsayan bu alan etrafındaki jeositler, arkeolojik ve kültürel sit alanları olarak değerlendirilmektedir (Gonca ve Erol, 2007). Bölgede, muhtelif boy ve ebatlarda, sulu veya susuz 20 den fazla sayıda obruk bulunmaktadır (Öztürk ve ark., 2010, Arık ve ark., 2012, Gonca ve Erol, 2007). Bu obruklardan 7 tanesi sulu, diğerleri ise kuru özelliindedir. Sahada yapılan ölçümlerde, bazılarının birkaç metre mertebesinde ve çok sığ oldukları, bazılarında ise 100 metreden daha fazla derinlik değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir (Gonca ve Erol, 2007) (Şekil 3).



Şekil 3. Karapınar yöresindeki Yarımoglu obruğundan görünüm

Figure 3. View from the Yaarımoglu sinkhole in Karapınar region

Orta Anadolu'da oldukça geniş bir alanda görülen, Orta Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı killi kireçtaşlarından oluşan İnsuyu formasyonunun görüldüğü bölgelerde obruklar meydana gelmiştir (Arık ve ark., 2012, Gonca ve Erol, 2007). İnsuyu formasyonu; açık kahve, beyaz, krem renkli ve kalsit dolgulu, kırılğan kireçtaşları ile magnezyumca zengin sarımsı yeşil renkli, marn ve tuf karışımından meydana gelmektedir (Arık ve ark., 2012). Obrukların oluşumunda, yüzey ve yeraltı sularına ilave olarak İnsuyu formasyonunun litolojik özelliği ve kimyasal bileşimi diğer önemli faktördür (Çörekçioğlu, 1994; Yavuz, 2010). Karapınar ve çevresindeki volkanizmanın etkisi ile yeraltı suyunda CO₂ konsantrasyonunu yüksek olup, bu yüksek konsantrasyonlu yeraltı suları içinde hareket ettiği kireçtaşlarını eriterek yeraltı mağaralarının oluşum sürecini hızlandırmaktadır. Bu sularında etkisi ile de oluşan yeraltı mağaralarının boşlukların yüzeye yaklaşması ile killi ve marnlı mağara tavanı, ağırlığı taşıyamadığından çökerek obrukları oluşturmaktadır (Arık ve ark., 2012). Çıralı (Şekil 4), Meyil, Tımraş (Şekil 5), Kızören (Şekil 6) ve Yılanoğlu obrukları, bölgede ismi bilinen doğa harikası

karstik yapıların en güzel örneklerindedir (Gonca ve Erol, 2007; Arık ve ark., 2012; Tapur ve Bozyiğit, 2016).



Şekil 4. Çıralı obruğundan görünüm
Figure 4. View from the Çıralı sinkhole



Şekil 5 Timraş obruğundan görünüm
Figure 5. View from the Timraş sinkhole



Şekil 6. Kızören obruğundan görünüm

Figure 6. View from the Kızören sinkhole

Karapınar potansiyel jeopark alanında yer alan diğer önemli jeolojik unsurlar ise, Meke ve Acıgöl Maarlarıdır (Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9).



Şekil 7 Meke gölünden görünüm

Figure 7. View from the Meke lake

Halk arasında Nazar boncuğu olarak ta adlandırılan Meke gölü, Karapınar- Ereğli yollu üzeri yaklaşık 7. km'de, ana asfaltın yaklaşık. 1.5 km kuzey batısında kalmaktadır. Karapınar potansiyel jeoparkı içerisinde yer alan Meke ve Acıgöl maarları yer almaktadır. Dünyanın en büyük kalderası olması açısından tek olan Ngorongoro kalderası gibi dünya'nın nazar boncuğu olan Meke maarı, Pleyistosen'den itibaren iki aşamalı volkanik aktivite ile meydana gelmiştir. İlk aşamada volkanik patlama ile genişçe bir krater oluşmuş ve daha sonraki süreçlerde krater su ile dolarak göl oluşumu meydana gelmiştir. Yaklaşık 8000 yıl önceki jeolojik süreçte ikinci patlama ile gölün ortasındaki ikinci koni meydana gelmiştir. Gölün içini dolduran suyun kimyası, K, Mg, Na, Ca sülfat ve klorürleri açısından zengin su niteliğinde olan gölden bir dönem tuz (NaCl) üretimi yapılmıştır. Göl çevresi kuş türlerinin çoğalma bölgesi olup su içerisinde mikrobiyolojik aktivite dışında canlı yaşamı bulunmamaktadır (Arık ve ark., 2012) (Şekil 8).



Şekil 8. Meke gölü'nün havada görünümü

Figure 8. Aerial view of Meke lake

Geniş, hafif kabarmış bir krater niteliğinde olan Acıgöl (Şekil 9) ise Karapınar Ereğli yolu üzerinde 5. kilometrede anayolla yaklaşık 500 metre mesafede yer alan tipik olarak suyla dolu ve sığ krater maar gölü görünümünde, volkan patlamasıyla meydana gelmiş çukurdur. Maar duvarlarındaki piroklastiklerde tipik "Base Surge" tabaka şekilleri görülmektedir. Bu krater ilerleyen zamanlarda su ile dolarak göl haline gelmiştir (Gonca ve Erol, 2007).



Şekil 9 Acıgölden görünüm

Figure 9. View from the Acıgol

JEOPARKLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF GEOPARKS)

Dünyada bilinen jeoparklardan olan Satun UNESCO Global Geopark ve Leye Fengshan UNESCO Global jeoparkları içerisindeki karst yapıları bulunmaktadır. Konya Karapınar Jeopark potansiyel alanında kalan obruk oluşumları da karst yapıları içerisinde yer almaktadır (Nazik, 2004). Ruban (2018) e göre; karst yapıları ile ilgili yaptığı araştırmada üç önemli noktaya işaret etmektedir. Bunlardan birincisi, birçok UNESCO Küresel Jeoparkı, karst'ı diğer jeolojik miras kaynakları ile birlikte turizmde önemli bir kaynak olarak kullanıldığını belirtmektedir. İkinci olarak; karst ile ilgili jeoparklar Avrupa ve Güneydoğu Asya'da yoğunlaştığından ve karst çeşitliliği UNESCO ağı tarafından iyi yansıtılmadığından bahsedilmekte ve üçüncü işaret noktası olarak karst kaynaklarının dikkate alınmasında Jeopark oluşturma çalışmalarının henüz başlanmadığı ülkeler için çok önemli olacağı vurgulanmıştır. UNESCO Küresel Jeopark ağı her tür karst kavramını kapsayacak şekilde genişlemelidir. Karst özelliklerinin gerçek dünyadaki dağıtımına bağlı olarak daha fazla jeopark oluşumu planlamak mantıklıdır. Bu amaçla, tüm karst türleri için hedef alanlar belirlenmeli ve ilgili ulusal otoritelerin temsilcileri jeopark önerileri yapmaları için teşvik edilmelidir (Ruban, 2018).

SONUÇLAR (RESULTS)

Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde jeolojik mirasın tüm dünyada öneminin arttığı anlaşılmaktadır. Jeoparkların içinde yer alan jeolojik miraslar, sadece o bölgede doğa turizmi ile birlikte kültür, sağlık ve inanç turizmlerini de barındırır (Çiftçi ve Güngör, 2016). 8000 yıllık tarihe sahip pek çok medeniyete ev sahipliği yapmış, Selçuklu devletinin başkenti Konya il sınırlarında yer alan Karapınar Potansiyel Jeopark alanı, jeolojik mirasın yanı sıra bu tarihi birikim ile de girift haldedir. Dünyadaki örnekleri ile birlikte değerlendirildiğinde jeomorfolojik özellikleri nedeniyle eşsiz güzellik sunan Karapınar Jeopark'ı, Orta Anadolu'nun ortasında yer alması, jeopark bölgesine ulaşımın kolaylığı ve konaklama olanaklarının cezbediciliği nedeniyle ön plana çıkan jeolojik bir oluşumdur. Kapadokya, Hasan ve Erciyes dağları volkanları, Tuz gölü gibi önemli jeolojik yapılara olan yakınlığı ile Jeoturizme meraklı olan insanlar için cezbedici bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Bölgenin korunması ve tanıtımı için, yerel halk ile birlikte sivil toplum kuruluşları, yerel yönetimler, kamu kurumları ve Üniversiteler sahip çıkmalıdır. Etkili bir tanıtımın ve korumanın yanı sıra, Karapınar potansiyel jeoparkın dünyadaki diğer örnekleri gibi sürdürülebilir olması için planlanması, projelendirilmesi, yönetilmesi ve finansal kaynakların sağlam temeller üzerine oturtulması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (Acknowledgment)

Bu çalışmada Dron ile hava fotoğraflarının çekilmesinde yardımcı olan Selçuk Üniversitesi Çumra MYO Coğrafi Bilgi Sistemleri programı Öğretim görevlisi, Ferhat Özcan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Arık F., Öztürk A., Diken A., 2012, Konya İlindeki Jeolojik Miras Alanlarından Örnekler, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Haber Bülteni*, 2012/1, 104.
- Arpat, E., 1976, İnsan ayağı izi fosilleri: Yitirilen bir doğal anıt, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 1, No. 2, 3-4.
- Arpat, E., Yılmaz, G., 1976, Göктаşı çukuru mu? Çökme çukuru mu?, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 1, No. 1, 12-14.
- Atalay, E. Ö., 1982, Kırklareli – Dupnisa Mağara Sistemi, *Yeryuvarı ve İnsan*, 7/2, 22-25.
- Barettino D., Vallejo M., Gallego E., 1999a., Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millenium ProGEO- European Association for Conversation of Geological Heritage and Sociedad Geologica de Espana, Madrid, p 459.

- BUGG,2019, <https://bangkok.unesco.org/content/satun-becomes-thailand%E2%80%99s-first-unesco-global-geopark> Erişim 02.05.2019
- Burek, C.V.,Prosser, C.D., 2008, The History of Geoconservation, *Geological Society, Spec. Pub.*300, London, p 312.
- Canik, B., 1972, Jeoloji mostralarına saygı, *TJK Yıllık Bülteni*, 1972.
- Cságoaly, Z.; Sæþórsdóttir, A.D., Ólafsdóttir, R.,2016, Tourism changing the edge of the wild, *J. Outdoor Recreat. Tour.*, 17, 1-8.
- Çiftçi, Y., Güngör, Y., 2011, Jeopark Projeleri Kapsamındaki Doğal Ve Kültürel Miras Unsurları İçin Standart Gösterim Önerileri, *MTA Dergisi*, 153:223-238. <http://dx.doi.org/10.19076/mta.18476>
- Çörekçioğlu, İ.,1994, Konya Karapınar-Kızören Arasındaki Obrukların Oluşumu ile İlgili Hidrojeolojik Etüd raporu, DSİ 4. Bölge Müdürlüğü, Konya.
- Doughty, P.,2008, How things began: the origin of geological conservation. In: The History of Geoconservation (Ed. Burek ve Prosser), *Geol. Soc. Spec. Pub.* 300, London, 7-16.
- Dowling, R., Newsome, D.,(Eds.), 2018, Handbook of Geotourism, Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2018.
- Erikstad, L. 2008, History of geoconservation in Europe. In: The History of Geoconservation (Ed. Burek ve Prosser), *Geol. Soc. Spec. Pub.* 300, London, 249-256.
- Gedik, A., 1977, Korunması gerekli doğal anıtlarımızdan Akyatan Gölü (Lagün), *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 2, No. 3, 38-44.
- GG, 2015b. <http://www.globalgeopark.org:Evaluation Mission/Revalidation Model Report>.
- GGN, 2015a. <http://www.globalgeopark.org/aboutGGN/ list/index.htm>
- Gonca, G., Erol T.,2007, *Proceedings of The Second International Symposium on Development Within Geoparks-Environmental Protection and Education*, Lushan-Jiangxi Province-China.
- Güldalı, N., 1972, Mağaralar: Yıkıma uğrayan doğal güzelliğimiz, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 2, No. 1, 70-72.
- Güldalı, N., Nazik, L., Dericci, Ş., 1983, Narlıkuyu Dilek Mağarası: Turizme açılmakta olan bir mağaranın öyküsü, *Yeryuvarı ve İnsan*, 8/4, 18-21.
- Güldalı, N.,Şaroğlu, F., 1983, Konya Yöresi Obrukları, *Yeryuvarı ve İnsan*, 7/4, 14-18.
- Haraldsson, H.V.; Ólafsdóttir, R., 2018, Evolution of tourism in natural destinations and dynamic sustainable thresholds over time, *Sustainability*, 10, 4788.
- Horasan B.Y., 2014, Konya Çevresi Toprakların Jeokimyası, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.*, Doktora Tezi, Konya, 236.
- Kandemir, R. Ve Köroğlu, F., 2017, Jeoturizm: Sürdürülebilir Turizme Doğu Karadeniz Bölgesinden Örnekler. *Dokap Bölgesi Uluslararası Turizm Sempozyumu (DOKAP)*, K.T.Ü, vol 1., pp 198-212 Trabzon, Türkiye.
- Kazancı, N. 2001. Jeolojik Miras Üzerine, *JMO Mavi Gezegen Popüler Bilim Dergisi*, No. 4, 4-9, Ankara.
- Ketin, İ., 1970, Türkiye’de önemli jeolojik aflörmanların korunması, *TJK Bülteni*, 13/2, 90-93, Ankara. (Aynı yazı Mavi Gezegen 4. Sayı, s.18-19’da (2001) tekrar yayınlanmıştır).
- Nazik, L., 2004, The Karst Regions of Turkey (According to the Morphogenesis and Properties).*Proceeding of int. Symp. on Earth System Sciences*, 77-82, İstanbul- Turkey.
- NUGG,2019,<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/list-of-unesco-global-geoparks/tanzania/ngorongoro-lengai>/Erişim 02.05.2019
- Ólafsdóttir, R.; Dowling, R., 2014, Geotourism and Geoparks—A tool for geoconservation and rural development in vulnerable Arctic environments. A case study from Iceland. *Geoheritage*, 6, 71-87.
- Ólafsdóttir, R.; Tverijonaite, E., 2018, Geotourism: A systematic literature review. *Geosciences*, 8, 234.
- Öngür, T., 1976, Doğal anıtların korunmasında yasal dayanaklar, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 1, No. 4, 35-38.
- Öztürk,A., Diken, A., Arık, F., Nalbantçılar M.T., Özen, Y., 2010, Karapınar Sinkholes, Geological Heritage In The Konya Region *1st International Geo-Conservation*

- Symposium and Southeastern Europe Countries ProGEO Group Meeting*. 15 -19 Eylül, s.16 – 17, Fırat University, Elazığ, Turkey.
- Perinçek, D., 1979, Cilo Dağı, Sat Gölleri, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 4, No. 3, 25-35.
- Ruban, D., A., 2018, Karst as Important Resource for Geopark-Based Tourism: Current State and Biases, *Resources*, 7, 82. doi:10.3390
- Sol, A., Ünder, H. 1999. A model for the conservation of geological remains as documents, *Environmental Geology*, 37, 26-28.
- SUGG,2019,<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/list-of-unesco-global-geoparks/thailand/satun/>Erişim 02.05.2019
- Şenol, F., Şenol, M., 1978, KB Bulgaristan'da bulunan Panora Karst Sistemi'ne bağlı bazı mağaralar ve Türkiye'de mağaracılık, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 3, No. 1, 11-14.
- Tapur T., Bozyiğit R., (2016), Konya İli Obruklarının Turizm Potansiyeli, *Marmara Coğrafya Dergisi*, Sayı: 34, pp: 253-267, ISSN: 1303-2429, E-ISSN: 2147-7825.
- Tekkaya, İ., 1976, İnsanlara ait fosil ayak izleri, *Yeryuvarı ve İnsan*, 1/2, 8-12.
- Tverijonaite, E.; Ólafsdóttir, R.; Þorsteinsson, P., 2018, Accessibility of protected areas and visitor behaviour, *J. Outdoor Recreat. Tour.*, 24, 1–10.
- UGG,2019,<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/list-of-unesco-global-geoparks/> Erişim 02.05.2019
- UGG,2019,<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/earth-sciences/unesco-global-geoparks/list-of-unesco-global-geoparks/> Erişim 02.05.2019
- Ulakoğlu, M. S., 1978, Yeni bir çağlayanlar dizisi, *Yeryuvarı ve İnsan*, V. 3, No. 1, 8-11.
- Wimbledon, W. A., Benton, M. J., Bevins, R. E., Black, G. P., Bridgland, D. R., Cleal, C. J., Cooper, R.G., May, V. J.,1995, The development of a methodology for the selection of British geological sites for conservation: *Part 1. Modern Geology*, 20 (2), 159.
- Wimbledon, W.A.P. 1996. National site election, a stop on the road to a European Geosite List. *Geologica Balcanica*, 26, 15-27.
- Yavuz S., (2010), Konya - Karapınar Havzası Karstik Özelliklerinin Belirlenmesinde Hidrojeolojik Parametrelerin Kullanılması, YL, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enst., Adana.
- Žaba, J., Gaidzik, K., 2011, The Ngorongoro Crater as the biggest geotouristic attraction of the Gregory Rift (Northern Tanzania, Africa)– geological heritage, *Geotourism* 1–2 (24–25) 27–46.
- Zouros N. Martini G. Frey M.L. (2003). *Proceedings of the 2nd European Geoparks Network Meeting*, Lesvos p. 184.

GENLEŞTİRİLMİŞ CAM TAKVİYELİ SİNTAKTİK KÖPÜK METALİN ÜRETİMİ, İÇYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

¹Büşra ŞAHİN , ²Ali GÖKŞENLİ 

^{1,2}*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE*

¹busra.sahin@renault.com, ²goksenli@itu.edu.tr

(Geliş/Received: 05.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.07.2020)

ÖZ: Bu çalışmada köpük metallerin geliştirilmiş bir şekli olan Sintaktik Köpük Metal (SKM) üretilmiş ve analiz edilmiştir. SKM’de yapı içindeki gözeneklilik, içi boş seramik küreler yardımıyla oluşturulmaktadır. SKM kapalı hücre yapısına sahiptir. SKM’lerin avantajları; hafiflik, yüksek basma dayanımı, titreşim sönümlenme ve enerji absorbe etme kabiliyetidir. Kompozit bir malzeme olan SKM’in üretiminde matris malzemesi olarak 7075 alüminyum, takviye malzemesi olarak da içi gözenekli yapıya sahip geliştirilmiş cam küre kullanılmıştır. Çalışmamızda SKM sıvı infiltrasyon yöntemi ile üretilmiştir. Bu üretim yönteminde kalıp ve küreler, 800 °C sıcaklıktaki fırında bekletildikten sonra fırından çıkarılmış ve kalıp boşluğuna cam küre ve ergimiş alüminyumun yerleştirilmesinden sonra 6,3 kPa’lık döküm basıncı uygulanmıştır. Üretilmiş olan SKM’lerin içyapısı analiz edilmiş, cam kürelerin yapı içinde homojen bir şekilde dağıldığı ve kürelerin kırılmadığı tespit edilmiştir. 25 mm çapında ve 30-33 mm yüksekliğe sahip silindirik SKM numunelerin yoğunluk değerleri Arşimed prensibi kullanılarak 1,33-1,68 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Gözeneklilik değerleri ise %53,3-57,2 olarak hesaplanmıştır. Mekanik testler için basma deneyleri gerçekleştirilmiş ve SKM’lerde görülen tipik plato eğrileri tespit edilmiştir. Plato dayanım değerleri 22-42 MPa, darbe sönümlenme enerji değerlerinin ise 12-22 MJ/m³ arasında olduğu görülmüştür. Bu değerler literatürde karşılaşılan verilerle uyumlu olduğu ve plato dayanım değeri ile enerji absorbe etme değerleri arasında doğrusal bir ilişkinin var olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Sintaktik Köpük Metal, Genleştirilmiş cam küre, Alüminyum, İçyapı, Mekanik özellikler*

Manufacturing of Expanded Glass Reinforced Syntactic Foam Metal and Investigation of Microstructure and Mechanical Properties

ABSTRACT: In this study Syntactic Foam Metals (SFM), which are a developed structure of foam metals, is manufactured and analyzed. SFM are materials with porous structure formed by using hollow ceramic spheres. SFM have a closed cell structure and is a kind of composite. As matrix metal 7075 aluminum and as reinforced material expanded glass is used. Advantages of SFM is lightness, high compression strength, vibration and shock absorbing characteristics. In this study as manufacturing method, liquid infiltration is used. By this method, the mold and spheres are heated in a furnace up to 800 °C. Later glass spheres and mold are taken out from the furnace, glass spheres and molten aluminum are placed inside the mold cavity and a casting pressure of 6,3 kPa is applied. Afterwards inner structure was analyzed and concluded that glass spheres were not broken and were homogenous dispersed inside the specimen. Archimed principle was used to determine the density of 25 mm diameter and 33 mm height cylindrical specimens. The density was 1,33-1,68 g/cm³. Porosity is calculated between 53,3-57,2%. Compression tests were performed to analyze mechanical performance and a typical plateau stress was observed as seen by different SFM’s. The plateau stress value was 22-42 MPa and shock absorbing energy 12-22 MJ/m³. These values are

accommodating with the values in the literature. Also linear relation was correlated between the plateau stress value and shock absorbing energy.

Key Words: *Syntactic Foam Metal, Expanded glass sphere, Aluminum, Microstructure, Mechanical properties*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hücreli Köpük metaller içi gözenekli yapıya sahip metelsel malzemelerdir ve içerdiği gözenekli yapının geometrisi ve şekli göz önüne alınarak farklı tanımlamalarda bulunmaktadır. Sünger veya gözenekli metallerde gözenekler düzensiz ve farklı geometrilere sahiptir. Hücreli ve köpük metallerde gözenekler benzer geometriye sahiptir [Banhart, 2000; Ozan ve diğ., 2011]. Metalik köpüklerle ilk çalışmalar 1948 yılında Sosnik tarafından ergimiş alüminyumun içinde cıvanın buharlaştırılması ile üretilmiştir [Yavuz, 2010]. Köpük metallerin avantajları; düşük yoğunluğa [Kenesei ve diğ., 2004; Zhu ve diğ., 2002], yüksek darbe [Kiratisaevve ve diğ., 2005; Yu ve diğ., 2008] ve titreşim sönümleme [Ramamurty ve diğ., 2004] karakterlerine, yüksek özgül rijitliğe, [Beigi ve diğ., 2013], düşük ısı ve elektrik iletim özelliklerine sahip olmasıdır. Günümüzde köpük metallerin kullanım alanları, sahip oldukları avantajlardan dolayı genişlemektedir [Bahnhard, 2001, Neikov, 2019, Fiedler ve diğ., 2020].

Köpük metaller iyapılarına göre açık ve kapalı hücre yapıları olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Açık hücreli yapılar yapı içindeki gözenekler birbirleriyle bağlantılıdır, yani bir gözenekten diğerine geçiş mümkündür. Çok farklı gözenek boyutlarında ve yoğunluklarında üretilen açık hücreli köpük metallerde gözenek boyutları 2-10 mm arasında değişirken, yoğunluğu kullanılan metalin yoğunluğunun %5-30 arasında değişmektedir ki bu da oldukça hafif yapıların elde edilmesini sağlamaktadır [Sobczak, 2003]. Kapalı hücre yapılarında ise gözenekler birbirinden hücre duvarları ile ayrılmakta, bir gözenekten diğerine geçiş olmamaktadır [Degischer, 2002]. Gözenek boyutları çoğunlukla 1-8 mm arasında değişmektedir. Köpük metalin karakteri ve özellikleri bu iyapı morfolojisinden oldukça etkilenmektedir. Kapalı hücreli yapılar yüksek özgül rijitlik ve darbe emme özelliği öne çıkarken, açık hücreli yapılar ise multifonksiyonel olarak filtreleme, ayırma, ses yalıtımı ve ısı transferi özellikleri önem kazanmaktadır [Hai ve diğ., 2007].

Sahip olduğu bu özelliklerden dolayı köpük metaller farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Köpük metal seçiminde iyapı morfolojisi, metaurjik özellikler, üretim maliyetleri, yapısal veya fonksiyonel özellikler göz önüne alınmaktadır. Kapalı hücre yapısında yapısal uygulamalar, fonksiyonel uygulamalarda açık hücreli yapılar tercih edilmektedir [Hintz ve diğ., 2000]. Yapısal uygulamalarda kapalı hücre yapısına sahip köpük metaller otomotiv endüstrisinde, taşıtlarda kapı traversleri, tamponlarda, yan kirişlerde hafifliği, [Srivastava ve diğ., 2007], yüksek darbe enerjisi [Claar ve diğ., 2000], titreşim [Strano ve diğ., 2015] ve ses sönümleme [Losito ve diğ., 2010] gibi özelliklerinden dolayı kullanılmaktadır [Banhart ve diğ., 2002]. Yüksek rijitlik/yoğunluk değerlerinin arandığı Uçak-Uzay [Nie ve diğ., 2018], Gemi İnşaat [Banhhart ve diğ., 1999] ve Demiryolu [Su, 2019] sektörlerinde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Biyomedikal endüstrisinde ise protez [Zhang ve diğ., 2009], dental [Salerno ve diğ., 2014] ve implantlarda vücuda uygunlu sebebiyle matris malzemesi titanyum veya kobalt-titanyum olan köpük metaller şeklinde kullanılmaktadır [Manakarı ve diğ., 2019]. Fonksiyonellik özelliklerin ön planda olduğu yerlerde açık hücreli köpük metallerin kullanılmaktadır. Filtrasyon işlemlerinde [Gauckler ve diğ., 1985], yüksek ısı iletim özelliklerinden dolayı alüminyum ve bakır matrisli köpük metaller ısı değiştiricilerinde [Banhart, 2003], yangına karşı dayanıklı ve tutuşmama özelliğinden dolayı inşaat sektöründe ve binalardaki acil çıkış bölgelerinde [Hipke ve diğ., 2014], Spor Ekipmanlarında (Zhu and Windle, 2002; Hai-jun *et al.*, 2007) kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek ses izolasyon özelliğinden dolayı yapılar [Deniz ve diğ., 2010] susturucularda, otoban ve viyadüklerde de kullanılmaya başlanmıştır [Degischer, 2002].

Köpük metallerin üretimi için değişik yöntemler mevcuttur. Açık veya kapalı hücre yapıları köpük metal elde edilmesine göre üretim yöntemi de değişmektedir. Üretim yöntemleri arasında Eriyiğe gaz enjekte edilmesi [Rajak ve diğ., 2017], gaz yapıcı maddeler ile üretim (Alporas) [Singh ve diğ., 2018], katı-

gaz ötektik katılaşma yöntem (Gasar) [Srivastava ve diğ., 2007], toz metallerin içerisine köpürtücü madde ilave edilmesi (Fominal) [Singh ve diğ., 2018], yarı ergiyik döküm ile üretilmesi [Banhart, 2001], gaz tutma/hapsetme yönteminin kullanılması [Shingh ve diğ., 2018] veya hassas (replika) döküm yöntemi bulunmaktadır [Yamada ve diğ., 2000]. İkame malzeme kullanılarak elde edilen köpük metallerde ikame malzeme olarak tuz [Vinay ve diğ., 2012; Jinnapat ve diğ. 2012], şeker [Jakubowicz ve diğ., 2013, Asavavisithchai ve diğ., 2010], karbonat [Yavuz ve diğ., 2011; Zhao ve diğ., 2005] gibi granüllerin veya içi boş kürelerin etrafını sararak katılaşması sağlanmaktadır. Granüller uygun çözücüler veya asitler içerisinde çözündürülerek veya eritilerek numuneden uzaklaştırılmakta, gözenekli ve açık hücreli bir yapı elde edilmektedir. Eğer döküm sonrası granül veya içi boş küre metalin içinde kalıyorsa, bu durumda elde edilen köpük metale "*Sintaktik Köpük Metal*" denmektedir [Banhart ,ve diğ., 1999; Su ve diğ., 2020, Al-Sahlani ve diğ., 2019].

Sintaktik Köpük Metallerin (SKM) avantajları; iç gözenek yapısının ve boyutlarının kolay kontrol edilebilmesi, homojen bir iç yapının elde edilebilmesi, yüksek darbe emme karakteristiği gösterebilmesi, farklı içi boş küre çaplarının veya malzemelerinin kullanılmasıyla mekanik özelliklerinin kolay bir şekilde kontrol edilebilmesi, düşük yoğunluk değerlerine sahip olmasıdır.

SKM, farklı iki malzemenin bir araya getirilerek üretilmesinden dolayı bir kompozit malzeme olarak da tanımlanmaktadır. Matris malzemesi olarak alüminyum [Orbulov, 2012], çinko [Pan ve diğ., 2018], magnezyum [Daoud ve diğ., 2007], çinko [Pan, 2018], titanyum [Mondal ve diğ., 2012], çelik [Rabiei ve diğ., 2007] gibi metaller kullanılmaktadır. İçi boş veya gözenekli takviye malzemesi olarak seramikler, senosferler [Mondal ve diğ., 2009] veya metaller [Rabiei ve diğ., 2006] tercih edilmektedir. Ancak takviye malzemesi olarak metal kullanmanın mahsuru, metalik matris malzeme ile reaksiyona girme eğiliminin yüksek olmasıdır. Seramik takviye malzemesi olarak Al_2O_3 , SiO_2 , SiC , B_4C ... kullanılmaktadır [Tao ve diğ., 2009; Balch ve diğ., 2006]. Küre çapları 0,01-10 mm arasında değişebilmektedir.

Sintaktik Köpük Metal (SKM), takviye malzemesi olan içi boş veya gözenekli kürelerin etrafının erimiş metal ile kaplanıp katılaşması şeklinde üretilmektedir. SKM'nin farklı üretim teknikleri geliştirilmiştir. Karıştırarak döküm (stir casting) yönteminde ergimiş metalin içine kürelerin atılıp karıştırılmaktadır [Singh ve diğ., 2017]. Bu yöntemin dezavantajları; mekanik veya titreşimli karıştırma işlemi esnasında kürelerin kırılabilmesi ve yoğunluk farkından dolayı kürelerin yüzmesi ve homojen olmayan yapının elde edilmesidir [Altenaiji ve diğ., 2012]. Toz metalürjisi ile üretim yönteminde toz metal mikro küreler homojen bir yapı olana kadar ile karıştırılmakta, kalıp içinde sıkıştırılmakta ve sinterleme ile ürün elde edilmektedir [Sun ve diğ., 2003, Lehmus ve diğ., 2014]. Bu yöntemin dezavantajı ise sıkıştırma işlemi esnasında kürelerin kırılma tehlikesi bulunmasıdır. Yaygın olarak kullanılan diğer yöntem ise infiltrasyon yöntemidir. İnfiltrasyon yönteminde ergimiş metal basınç altında küreler arasına sevk edilmektedir. Basınç oluşturmak için değişik yöntemler kullanılmaktadır; yer çekimi yardımıyla [Castro ve diğ., 2012; Huo ve diğ., 2011], vakum altında [Dorian ve diğ., 2005, Santa Maria ve diğ., 2012] veya mekanik yöntemler kullanılarak [Zhang ve diğ., 2007, Lin ve diğ., 2016] basınç oluşturma şeklindedir. Mekanik yöntem ile infiltrasyon metodunda kalıp üzerine yerleştirilen ağırlık veya piston yardımıyla döküm basıncı oluşturulmaktadır.

Çalışmamızda Sintaktik Köpük metal, mekanik infiltrasyon yöntemi ile imal edilecektir. Mekanik infiltrasyon yönteminin en büyük avantajı uygulanan basınç değerinin diğer infiltrasyon yöntemlerinden daha yüksek olmasından dolayı karmaşık yapıdaki ve ince cidarlı ürünlerin de üretilmesidir [Rohatgi ve diğ., 2011]. Mekanik infiltrasyon üretim yöntemindeki en büyük problem, optimum basınç değerinin tespit edilmesidir. Gereğinden düşük basınç değeri uygulandığında içyapı gözenekli ve boşluklu olma olasılığı bulunmaktadır. Gereğinden yüksek basınç değerleri uygulandığında ise kürelerin kırılma tehlikesi bulunmaktadır [İmre, 2011]. Çalışmamızda matris malzemesi olarak alüminyum, takviye malzemesi olarak da geliştirilmiş cam kullanılmıştır. Geliştirilmiş camın diğer içi boş seramik küre malzemelere göre avantajı, içinin gözenekli (petekimsi) bir yapıya sahip olmasından dolayı daha yüksek enerji absorbe edebilme yeteneğine sahip olmasıdır. Ayrıca geliştirilmiş camın üretim yönteminin maliyeti diğer seramik kürelere göre daha düşük olmasından dolayı üretilen Sintaktik Köpük Metalin maliyetini de düşürecektir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL METHODS)**Sintaktik Köpük Metal Malzemelerin ve Kalıbın Tanıtılması (Introduction of Syntactic Foam Metal Materials and Mold)**

Sintaktik köpük metal üretiminde takviye malzemesi olarak "Genleştirilmiş cam" kullanılmıştır. Geri dönüştürülmüş, camın içine köpürücü malzeme ilave edip karıştırdıktan sonra yüksek sıcaklıkta döküm işleminin yapılması ile genleştirilmiş cam elde edilmektedir (şekil 1). Farklı çaplarda üretilen camlardan çalışmamızda 2-4 mm çapa sahip küreler kullanılmıştır. Genleştirilmiş cam küreler hafifliği ve gözenekli iyapı özelliklerinden dolayı makine, tarım, yağ ve gaz biofiltrasyonu gibi farklı sektörlerde kullanılabilmesinin yanı sıra en çok inşaat sektöründe ısı yalıtımında kullanılmaktadır ve basma dayanımı 1,4 MPa'dır.



Şekil 1. İçi gözenekli bir yapıya sahip genleştirilmiş cam

Figure 1. Porous structure of expanded glass

Sintaktik köpük metal üretiminde matris malzemesi olarak 7075 alüminyum kullanılmıştır. Bu metalin seçilme nedeni düşük yoğunluğa ($2,81 \text{ g/cm}^3$) ve yüksek süneklığe sahip olmasıdır. Yüksek süneklilik karakteri özellikle darbe emme vazifesinin matris tarafından karşılandığı durumlarda önem kazanmaktadır.

Çalışmamızda sintaktik köpük metal (SKM), mekanik infiltrasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Mekanik infiltrasyon yönteminde cam küreler kalıp içine yerleştirildikten sonra ergimiş alüminyum kalıp içine dökülmektedir. Kalıp içine dökülen alüminyumun küreler arasındaki boşluğu doldurabilmesi için gerekli basınç, kalıp üzerine yerleştirilen bir pim-tabla mekanizması ve onun üzerine yerleştirilen ağırlık yardımıyla oluşturulmaktadır (şekil 2). Yerleştirilen ağırlık ile kalıp içinde 6,38 kPa'lık döküm basıncı elde edilmiştir.

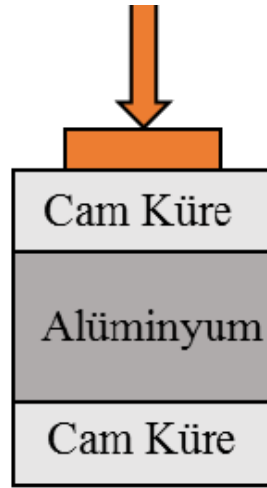
Çalışmamızda kullanılan kalıp boşluğu 25 mm çapında ve 40 mm yüksekliğe sahip silindirik bir yapıdır. Kalıp iki parçalı olup, döküm sonrası kalıp açılarak numune çıkarılmaktadır. Kalıp fırın içine yerleştirileceğinden yüksek sıcaklığa dayanıklı olup takım çeliğinden imal edilmiştir.



Şekil 2. Sintaktik Köpük Metal üretiminde kullanılan kalıp
Figure 2. Mold used in manufacturing of Syntactic Foam Metal

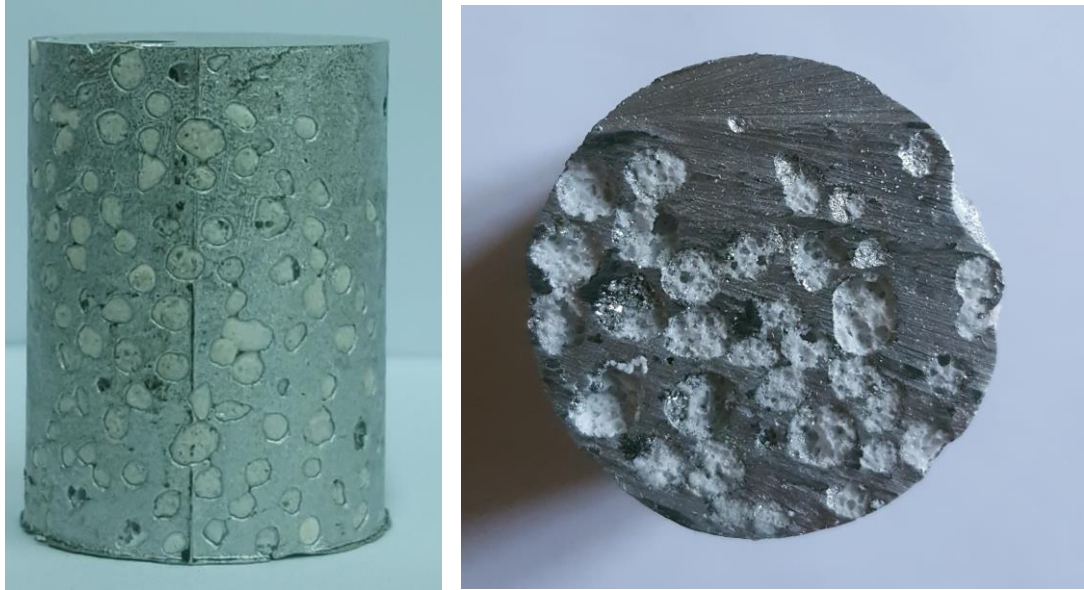
Sintaktik Köpük Metalin Üretimi (Manufacturing of Syntactic Foam Metal)

Çalışmamızda sintaktik köpük metal üretimin ilk aşamasında alüminyum pota içine konarak ergitilmek üzere 800 °C sıcaklıktaki kamara fırınına yerleştirilmiştir. Bir saat sonra içinde genişletilmiş cam küreler bulunan pota ve kalıp da aynı kamara fırınına yerleştirilmiş ve 20 dakika fırın içinde tutulmuşlardır. Cam kürelerinin ve kalıbın fırın içinde bekletmenin amacı, kalıp ve cam kürelerin ısıtarak daha sonra yapılacak döküm esnasında sıvı alüminyumun erken soğumadan cam küreler arasındaki boşlukları doldurabilmesidir. Daha sonra kalıp fırından çıkarılmış, ergitilmiş alüminyum ve cam küreler farklı sıralamalarla kalıp içine dökülmüştür. Döküm sonrası kalıbın üstü pim ile kapatılmış ve pimin üstünde bulunan tablaya ağırlık konarak döküm basıncı oluşturulmuştur. Deneysel çalışmamızda farklı sıralamalarla cam küre ve alüminyumun kalıp içine yerleştirilmesindeki amaç, hangi yerleştirilme düzeni sonucunda daha homojen yapının oluşturacağını tespit edilmesidir. Bu amaçla kalıp içine farklı cam küre-ergimiş alüminyum yerleştirme düzenekleri oluşturulmuştur. İlk denemelerde kalıbın içine önce ergimiş alüminyum dökülmüş ve hemen üzerine cam küreler yerleştirilip kalıp üstü pim-tabla düzeneği ile kapatılmış ve tablanın üzerine ağırlık yerleştirilerek döküm basıncı elde edilmiştir. Ancak bu şekilde üretilen numunelerin homojen bir içyapıya sahip olmadıkları tespit edilmiştir. Döküm sonrası numunenin boylamasına kesiti alındıktan sonra cam kürelerin, alüminyumdan daha hafif olmalarından dolayı, tam olarak numune içinde homojen dağılmadığı ve cam kürelerin numunenin üst kısmında biriktiği gözlemlenmiştir. Daha sonra cam küreler ve ergitilmiş alüminyum sandwich tipi şeklinde kalıba yerleştirilmiştir. Bu yöntemde kalıbın içine önce 3 gram cam küre yerleştirilmiş, üzerine kalıbın dörtte üçünü dolduracak şekilde ergimiş alüminyum dökülmüş ve geriye kalan kısmına da 2 gram cam küre yerleştirilmiştir (Şekil 3). Bu yerleştirme şeklinde elde edilen numunelerin boyuna kesiti alınarak incelenmiş ve cam kürelerin köpük metal içinde dengeli ve homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 3. Sintaktik Köpük Metal üretiminde kalıp boşluğunun içindeki malzemelerin yerleşimi

Figure 3. Layout of the materials inside the mold cavity by manufacturing of Syntactic Foam Metal

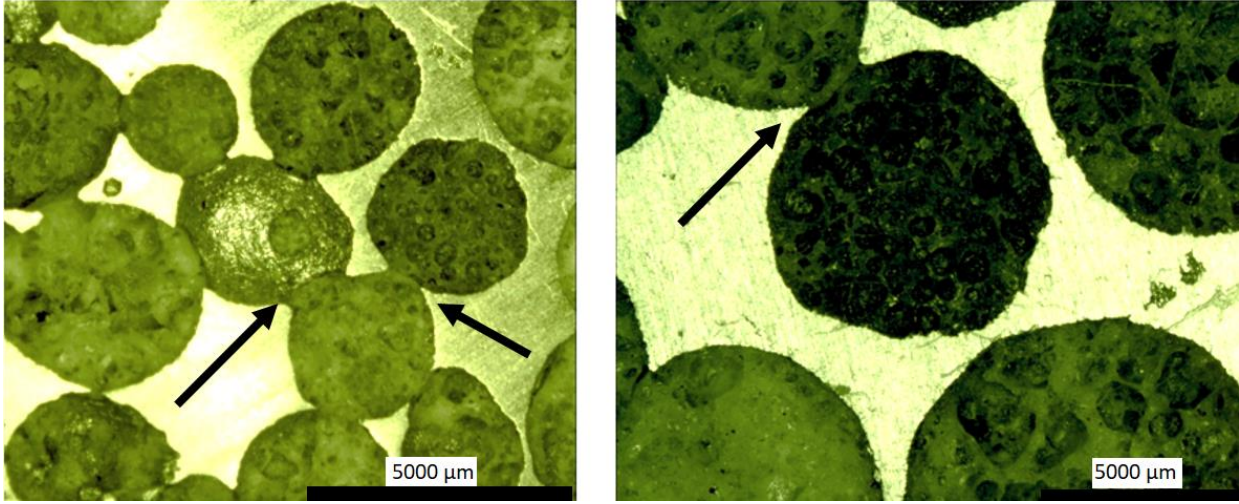


Şekil 4. Sintaktik Köpük Metal numunesi

Figure 4. Syntactic Foam Metal specimen

İyapı Analizleri (Microstructure Analysis)

Sintaktik Köpük Metalin (SKM) üretiminden sonra iyapı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde amaç, oluşabilecek muhtemel iyapı kusurlarının olup olmadığının tespit edilmesidir. İyapı kusurları eksik döküm, yetersiz nüfusiyet, cam kürelerin basınç altında kırılması, küreler arasında boşlukların olması veya kürelerin birbirine kaynaması şeklinde olabilmektedir. İyapı analizleri için deney numuneleri enlemesine kesilmiş ve sırasıyla 180, 300, 600 ve 1000 ile zımparalanmıştır. Yüzeylerin parlatılmasından sonra numunelerin iyapısı optik mikroskop (Nikon SMZ 800 OM) ile incelenmiştir (şekil 5).



Şekil 5. Sintaktik Köpük Metalin içyapısı

Figure 5. Microstructure of Syntactic Foam Metal

İnceleme sonucu alüminyumun küreler arasındaki boşlukları kusursuz bir şekilde doldurduğu ve küreler arasında boşlukların olmadığı, kürelerde herhangi bir çatlama ve kırılmanın olmadığı ve sıvı alüminyum ile dolmadığı tespit edilmiştir. Buna karşın bazı kürelerin, şekil 5 de oklarla gösterilen bölgelerde birbiriyle kaydığı tespit edilmiştir. Bu birleşme ya cam kürelerin fırın içinde bekletilirken sinterlenmesi sonucu veya döküm esnasında yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle oluşmuş olabileceği düşünülmektedir.

Yoğunluk ve Gözeneklilik Analizleri (Density Analysis)

Yoğunluk hesaplamaları için Arşimed prensibi kullanılmıştır. 25 mm çapında ve 30-33 mm arasında yüksekliği değişen silindirik numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri sonrası numunelerin yoğunluk değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 1). Gözeneklilik yüzdesinin (G_{KM}) hesaplanmasında Taherishargh [Taherishargh ve diğ., 2014] tarafından önerilen matematiksel denklemler (1) ve (2) esas alınmıştır. Denklemlerde V_{KM} köpük metalin hacmini, m_{KM} köpük metalin kütesini, m_{Al} alüminyumun kütesini, $m_{Küre}$ cam kürelerin kütesini ρ_{Al} alüminyumun yoğunluğunu, $\rho_{Küre}$ cam kürelerin yoğunluğunu, ρ_{KM} köpük metalin yoğunluğunu temsil etmektedir. (1) ve (2) no.lu denklemlerin kullanılmasıyla elde edilen numunelerin gözeneklilik yüzdeleri çizelge 1 de görülmektedir.

$$\rho_{Küre} = \frac{m_{Küre}}{V_{KM} - \left(\frac{m_{KM} - m_{Küre}}{\rho_{Al}} \right)} \quad (1)$$

$$G_{KM} = \left(1 - \frac{\rho_{Küre}}{\rho_{KM}} \right) \cdot \left(\frac{V_{KM} - \left(\frac{m_{KM} - m_{Al}}{\rho_{Al}} \right)}{V_{KM}} \right) \quad (2)$$

Çizelge 1. Sintaktik Köpük Metal numuneleri, boyutları ve yoğunlukları*Table 1. Syntactic Foam Metal specimens, dimensions and densities*

Numune	Yükseklik [mm]	Çap [mm]	Ağırlık [g]	Yoğunluk [g/cm ³]	Gözeneklilik [%]
1	30	25	23	1,53	53,3
2	33	25	27	1,68	57,2
3	32	25	23	1,44	55,5
4	32	25	25	1,56	55,5
5	33	25	21	1,33	57,1

Yoğunluk analizi sonucu yoğunluk değerlerinin 1,33-1,68 g/cm³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Yoğunluk değerinin ortalama 1,5 g/cm³ olması, hedeflenen hafifletme kriterinin sağlandığı tespit edilmiştir. 7075 alüminyumun yoğunluk değerinin (2,81 g/cm³) göz önüne alınmasıyla ağırlığın yaklaşık %48 azaltıldığı tespit edilmiştir. Gözeneklilik analizleri sonucunda üretilen köpük metal numunelerin gözeneklilik değerlerinin % 53,3-57,2 arasında değiştiği tespit edilmiştir.

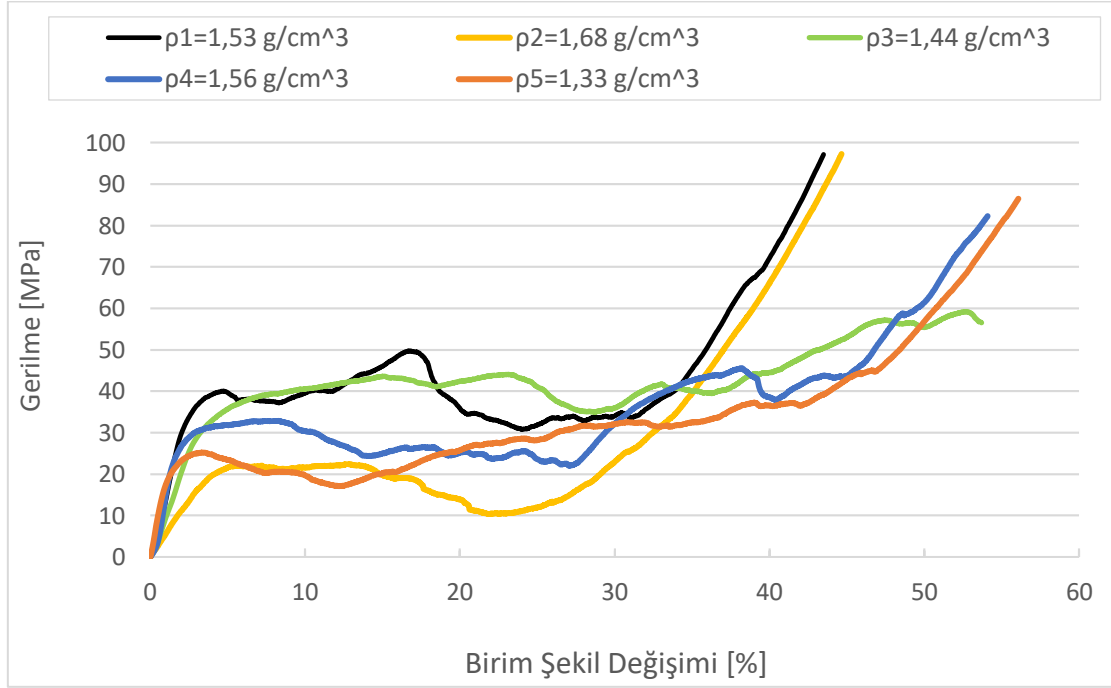
Mekanik Deneyler (Mechanical Tests)

Sintaktik Köpük Metal'in mekanik özelliklerini tespit etmek için basma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 50 kN kapasitesli Shimadzu AG-IS çekme basma test makinasında yapılmıştır (Şekil 6). Basma testi ISO 13314 standardına uygun olarak yapılmıştır ve çene ilerleme hızı 0,0016 – 0,0022 1/s olarak tespit edilmiştir.

**Şekil 6. Basma deneyi***Figure 6. Compression test*

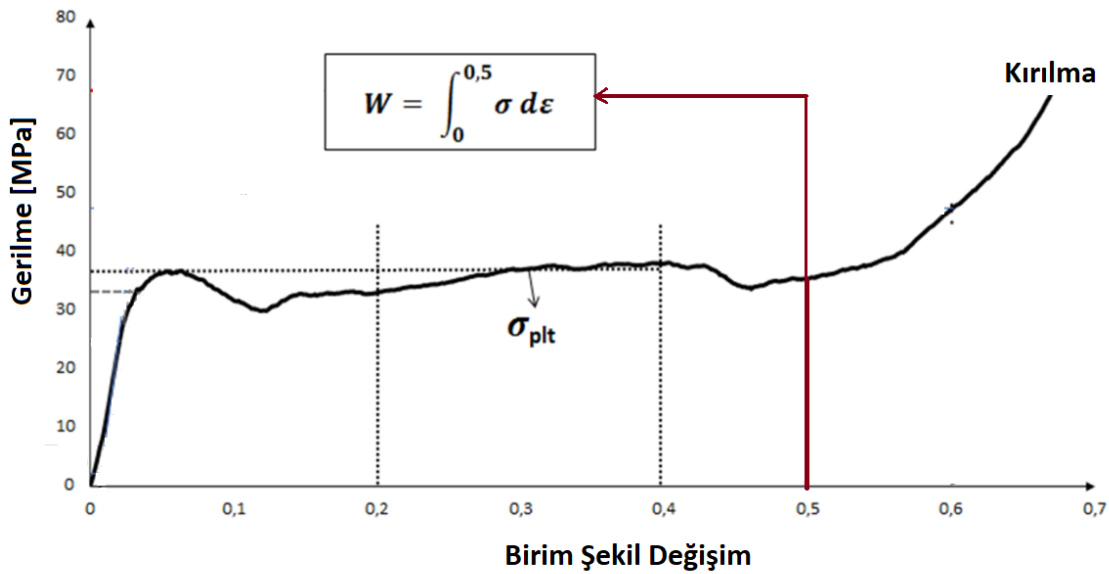
Basma testleri sonrası oluşan gerilme-birim şekil değişim grafikleri analiz edilmiştir. Şekil 7 de farklı yoğunluklara sahip numunelerin basma deneyleri sonucu oluşan gerilme-birim şekil değişim grafikleri görülmektedir. İnceleme sonrası köpük metallerde görülen tipik bir plato eğrisinin numunelerimizde de tespit edilmiştir. Yaklaşık %5 birim şekil değişim değerlerinde başlayan plato bölgesi %40 deformasyon değerine kadar devam etmiştir. Plato bölgesinde, uygulanan basma gerilmeleri altında yapı içindeki cam küreler kırılmakta ve matris alüminyum malzemenin sünek karakteri yardımıyla Sintaktik Köpük Metal bir yay elemanı gibi davranarak enerji absorbe etme karakteri göstermektedir.

Köpük metallerin basma deney sonrası plato dayanım ve darbe sönümleme enerji değerlerini tespit etmek için ISO 13314 standardı esas alınmıştır. Plato gerilme değeri %20 ile %40 plastik deformasyon esnasında meydana gelen gerilme değerlerin aritmetik ortalaması şeklinde hesaplanmaktadır. Absorbe edilen enerji (W) ise, %50 plastik deformasyona kadar meydana gelen gerilme – birim şekil değişim eğrisinin altındaki alanın hesaplanması ile tespit edilmektedir (Şekil 8).



Şekil 7. Farklı yoğunluklara sahip numunelerin gerilme – birim şekil değişim grafikleri

Figure 7. Stress – strain curves of specimens with different densities



Şekil 8. ISO 13314 standardına göre plato gerilme (σ_{plt}) ve absorbe edilen enerji (W) değerlerinin tespit edilmesi

Figure 8. Determining plateau stress (σ_{plt}) and energy absorption (W) values according to ISO 13314

Yukardaki açıklamalar doğrultusunda gerçekleştirilen basma testleri sonucu ISO 13314 standardına göre plato dayanım ve absorbe edilen enerji (W) değerleri çizelge 2 de görülmektedir.

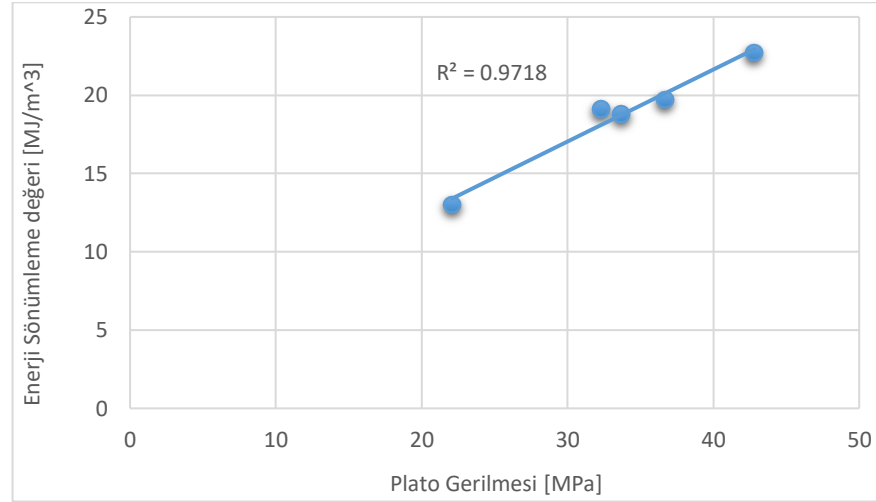
Çizelge 2 de de görüldüğü gibi plato gerilmesinin 22-42 MPa ve enerji sönümlenme değerinin ise 13-22 MJ/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerler literatürdeki verilerle uyumludur [Taherishargh ve diğ., 2014, Szlancsik ve diğ., 2015, Duarte ve diğ., 2016].

Çizelge 2. Sintaktik Köpük Metal numunelerinin plato gerilme ve enerji sönümlenme değerleri

Table 2. Syntactic Foam Metal specimens plateau stress and energy absorbing values

Numune	Yoğunluk [g/cm ³]	Plato Gerilmesi [MPa]	Enerji Sönümlenme değeri [MJ/m ³]
1	1,53	33,7	18,8
2	1,68	22,1	13,0
3	1,44	42,8	22,7
4	1,56	36,7	19,7
5	1,33	32,3	19,1

Basma deney sonuçlarının incelenmesi neticesinde plato gerilmesi ile enerji absorbe etme değeri arasında doğrusal bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir (şekil 9). Bu ilişkide $R^2=0,9718$ dir. Şekil 8 deki W 'nin hesaplanmasında kullanılan denklemde de görüldüğü gibi absorbe edilen enerji (W) ile plato gerilmesi arasında da bir ilişki mevcuttur ve W değerinin tespit edilmesinde basma eğrisinin altındaki alanın büyüklüğü, plato gerilmesinin artmasıyla artmaktadır.



Şekil 9. Enerji sönümlenme değeri ile plato gerilmesi arasındaki ilişki

Figure 9. Relation between energy absorbing value and plateau stress

SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada alüminyum matrisine sahip, genleştirilmiş cam takviyeli Sintaktik Köpük Metal (SKM) üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak mekanik infiltrasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin seçilme nedeni, karmaşık ve ince cidarlı yapıların üretimine uygun olmasıdır. Döküm kalıbı içine cam küre ve ergimiş alüminyumun farklı yerleştirme kombinasyonları oluşturularak numuneler üretilmiş ve Sandwich tipi yerleştirme yönteminin en uygun yöntem olduğu kanaatine varılmıştır. Mekanik infiltrasyon yönteminde 6,3 kPa'lık döküm basıncı uygulanmıştır. Döküm sonrası gerçekleştirilen içyapı analizlerinde cam küreler arasındaki boşluğun ergimiş alüminyum ile dolduğu, gözeneksiz bir içyapının oluşturulduğu tespit edilmiştir. Bazı numunelerde cam kürelerin birbiriyle kısmen kaynadığı gözlemlenmiştir. Bunun muhtemel nedeninin fırın içinde ön ısıtmaya maruz bırakılan cam kürelerin kısmen sinterlendiği kanaatine varılmıştır. SKM'lerin gözeneklilik değerlerinin %53,3-57,2 arasında

değiştirdiği, yoğunluk değerlerinin ise ortalama 1,5 g/cm³ olduğu hesaplanmıştır ki bu da hedeflenen hafif yapı ürünlerin elde edilmesi amacıyla ulaşıldığını göstermektedir. Basma deneyleri sonucu literatürdeki araştırmalarda SKM'lerde görülen tipik plato eğrisinin ürettiğimiz numunelerde de oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu eğrinin varlığı, sabit gerilme altında numunenin sürekli plastik deformasyona uğramasını ve bu esnada SKM içindeki cam kürelerin kırılarak SKM'nin enerji absorbe etme özelliğini göstermektedir. Plato gerilmesinin 22-42 MPa ve enerji sönümlenme değerinin 13-22 MJ/m³ arasında değiştiği tespit edilmiştir. Plato gerilmesi ile enerji absorbe etme değerleri arasında doğrusal ve güçlü bir ilişkinin varlığı tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, MYL-2018-41050 no.lu Bilimsel Araştırma Proje (BAP) ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Altenajji, M., Schleyer G.K., Zhao, Y.Y., 2012, "Characterization of Aluminum Matrix Syntactic Foams Under Static and Dynamic Loading, Composites and Their Properties", *IntechOpen*, DOI: 10.5772/48560.
- Al-Sahlanı, K., Kisi, E., Fiedler, T., 2019, "Impact of Particle Strength and Matrix Ductility on the Deformation Mechanism of Metallic Syntactic Foam", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 786, pp. 292-299.
- Asavavisithchai, S., Nisaratanaporn, E., 2010, "Fabrication of Open-Cell Silver Foams Using Disaccharide as Space Holders", *Journal of Science*,; Vol.37(2), pp. 222-230.
- Balch, D. K., Dunand, D. C., 2006, "Load partitioning in aluminum syntactic foams containing ceramic microspheres", *Acta Materialia*, Vol. 54(6), pp. 1501-1511.
- Banhart, J., 2000, "Manufacturing routes for metallic foams", *Journal of Metals*, Vol. 52(12), pp. 22-27.
- Banhart, J., 2001, "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol.46, pp. 559-632.
- Banhart, J., 2003, "Aluminum Foams for Lighter Vehicles", *International Journal of Vehicle Design*, pp. 1-19.
- Banhart, J., Ashby, M. F., Fleck, N., 1999, "Metal foams and porous metal structures ", *Metal Innovation Technologie*, Vol. 83, pp. 255-262.
- Banhart, J., Weaire, D., 2002, "On the road again: metal foams find favor", *Physics Today*, Vol. 55, pp.37-42.
- Castro, G., Nutt, S.R., 2012, "Synthesis of syntactic steel foam using mechanical pressure infiltration", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 535, pp. 274- 280.
- Claar, T. D., 2000, "Ultra-lightweight aluminum foam materials for automotive applications." *SAE transactions*, pp. 98-106.
- Daoud, A., El-Khair, M. A., Abdel-Aziz, M., Rohatgi, P., 2007, "Fabrication, microstructure and compressive behavior of ZC63 Mg-microballoon foam composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 67(9), pp. 1842-1853.
- Degischer, H.P., Kriszt, B., 2002, "Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications", Wiley-VCH, ISBN 3-527-29320-5.
- Dorian, K., Balcha, J., O'Dwyer, G., Davisc, R., Cadyd, C.M., Gray, G.T., Dunanda, D.C., 2005, "Plasticity and damage in aluminum syntactic foams deformed under dynamic and quasi-static conditions", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 391, pp. 408-417.
- Duarte, I., Ferreira M.F., 2016, "Composite and Nanocomposite Metal Foams", *Materials*, Vol. 9 (79), 1-34.
- Fiedler, T., Nima Movahedi, York, L., Broxtermann, S., 2020, "Functionally-Graded Metallic Syntactic Foams Produced via Particle Pre-Compaction", *Metals*, Vol. 10, pp. 312-324.

- Gauckler, L.J., Waeber, M.M., Conti, C., Duliere, J. M., 1985, "Ceramic Foam for Molten Metal Filtration", *Journal of Metals*, September.
- Hai-jun, Y., Guang-chun, Y., Xiao-lin, W., 2007, "Sound insulation property of Al-Si closed-cell aluminum foam bare board material", *Transactions of nonferrous metals society*, Vol. 17, pp. 93–98.
- Hintz, C., 2000, „Mechanische und tribologische Eigenschaften präzisionsgegossener Schwämme und Werkstoffverbunde", *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, Vol. 31(6), pp.574-581.
- Hipke, T., Hohlfeld, J., Rybandt, S., 2014, "Functionally aluminum foam composites for building industry", *Procedia Materials Science*, Vol.4, pp. 133-138.
- Huo, D., Yang, J., Zhou, X., Wang, H., Zhang, T., 2012, "Preparation of open-celled aluminum foams by counter-gravity infiltration casting", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 22, pp. 85-89.
- Jakubowicz, J., Adamek, G., Dewidar, M., 2013, "Titanium foam made with saccharose as a space holder", *Journal of Porous Materials*, Vol. 20, pp. 1137–1141.
- Jinnapat, A., Kennedy, A.R., 2010, "The manufacture of spherical salt beads and their use as dissolvable templates for the production of cellular solids via a powder metallurgy route", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 499, pp. 43-47.
- Kenesei, P., Kadar, C., Rajkovits, Z., Lendvai, J., 2004, "The influence of cell size distribution on the plastic deformation in metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 50, pp. 295–300.
- Kheradmand, B., Otraj, S., Soleimanpour, Z., Beigyfar, M., 2013, "Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam", *Life Science Journal*, Vol. 10.
- Kiratisaevae, H., Cantwell, W., 2005, "Low-velocity Impact Response of High-performance Aluminum Foam Sandwich Structures", *Journal of Reinforced Plastics and Composite*, Vol. 24(10), pp. 1057-1072.
- Lehmhusa, D., Weisb, J., Baumeisterb, J., Peronic, L., Scapinc, M., Ficherac, C., Avallec, M., Bussea, M., 2014, "Quasi-static and dynamic mechanical performance of glass microsphere- and cenosphere-based 316L syntactic foams", *Procedia Materials Science*, Vol. 4, pp. 383 – 387.
- Lin, Y., Zhang, Q., Ma, X., Wu, G., 2016, "Mechanical behavior of pure Al and Al–Mg syntactic foam composites containing glass cenospheres", *Composites: Part A*, Vol. 87, pp. 194–202.
- Manakari, V., 2019, "Evaluation of wear resistance of magnesium/glass microballoon syntactic foams for engineering/biomedical applications." *Ceramics International*, Vol.11.
- Mondal, D. P., 2012, "Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route", *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 82-89.
- Mondal, D. P., Das, S., Ramakrishnan, N., Bhasker, K. U., 2009, "Cenosphere filled aluminum syntactic foam made through stir-casting technique", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 40(3), pp. 279-288.
- Neikov, O., 2019, "Handbook of Non-Ferrous Metal Powders – Technologies and Applications", 2nd Edition, Elsevier.
- Nie, Z., Lin, Y., Tong, Q., 2018, "Numerical simulations of two-phase flow in open-cell metal foams with application to aero-engine separators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 127 pp. 917-932.
- Onofrio, L., Barletta, D., Dimiccoli, V., 2010, "A wide-frequency model of metal foam for shielding applications", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 52(1), pp. 75-81.
- Orbulov, I. N., 2012, "Compressive properties of aluminum matrix syntactic foams", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 555, pp. 52-56.
- Orbulov, I.N., 2011, "Syntactic foams produced by pressure infiltration – the effect of pressure and time on infiltration length", *Mechanical Engineering*, Vol. 55(1), pp. 21–27.
- Ozan, S., Katı, N., 2011, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- Pan, L., 2018, "Zn-Matrix Syntactic Foams: Effect of Heat Treatment on Microstructure and Compressive Properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol.7.

- Pan, L., Yang, Y., Ahsan, M. U., Luong, D. D., Gupta, N., Kumar, A., Rohatgi, P. K., 2018, "Zn-matrix syntactic foams: Effect of heat treatment on microstructure and compressive properties", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 731, pp. 413-422.
- Polat, D., Keleş, Ö., Taptık, Y., 2010, "Metalik Köpükler, Alüminyum Metalik Köpük ve Üretim Yöntemleri" *Metal Dünyası*, Vol. 54.
- Rabiei, A., Neville, B., Reese, N., Vendra, L., 2007, "New Composite Metal Foams Under Compressive Cyclic Loadings", *Materials Science Forum*, Vols. 539-543, pp. 1868-1873.
- Rabiei, A., Vendra, L., Reese, N., Young, N., Neville, P., Processing and Characterization of a New Composite Metal Foam, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 9 (2006) pp. 2148 to 2153.
- Rajak, D.K., Kumaraswamidhas, L.A., Das, S., 2017, "Technical Overview of Aluminum Alloy Foam", *Review Advanced Materials Science*, Vol. 48, pp. 68-86.
- Ramamurty, U., Paul, A., 2004, "Variability in mechanical properties of a metal foam", *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 869-876.
- Rohatgi, P., 2011, "The synthesis, compressive properties, and applications of metal matrix syntactic foams", *Journal of Materials*, Vol. 63(2), pp. 36-42.
- Salerno, A., Netti, P. A., 2014, "Introduction to biomedical foams." *Biomedical Foams for Tissue Engineering Applications*, pp. 3-39.
- Santa Maria, J.A., Schultz, B.F., Ferguson, J.B., Rohatgi, P.K., 2013, "Al-Al₂O₃ syntactic foams – Part I: Effect of matrix strength and hollow spherize on the quasi-static properties of Al-A206/Al₂O₃ syntactic foams", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 582, pp. 415-422.
- Singh, S., Bhatnagar, N., "A Survey of Fabrication and Application of Metallic Foams (1925-2107)", *Journal of Porous Materials*, Vol. 25, pp. 537-554.
- Sobczak, J., 2003, "High Porosity Media for Transportation – Selected Aspects", *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, Vol. 10, pp. 34-42.
- Srivastava, V.C., Sahoo, K.L., 2007, Processing, Stabilization and Applications of Metallic Foams. *Art of Science*, *Materials Science-Poland*, 25, 733-753.
- Su, L., 2019, "Experimental study on the closed-cell aluminum foam shock absorption layer of a high-speed railway tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 119, pp. 331-345.
- Su, M., Wang, H., Hao, H., Fiedler, T., 2019, "Compressive Properties of Expanded Glass and Alumina Hollow Spheres Hybrid Reinforced Aluminum Matrix Syntactic Foams", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 821, pp. 1-11.
- Sun, D.X., Zhao, Y.Y., 2003, "Static and Dynamic Energy Absorption of Al Foams Produced by the Sintering and Dissolution Process", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 34(1), pp 69-74.
- Szlancsik, A., Katona, B., Bobor, K., Májlínger, K., Orbulov, I. N., 2015, "Compressive behaviour of aluminium matrix syntactic foams reinforced by iron hollow spheres", *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 230-237.
- Taherishargh, M., Sulong, M. A., Belova, I. V., Murch, G. E., Fiedler, T., 2015, "On the particle size effect in expanded perlite aluminum syntactic foam", *Materials & Design*, Vol. 66, pp. 294-303.
- Tao, X. F., Zhang, L. P., Zhao, Y. Y., 2009, "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres", *Materials & Design*, Vol. 30(7), pp. 2732-2736.
- Vinay, B.U., Sreenivas Rao, K.V., 2012, "Development of Aluminum Foams by Different Methods and Evaluation of its Density by Archimedes Principle", *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Vol. 2(4), 541-549.
- Yamada, Y., Shimojima, K., Sakaguchi, Y., Mabuchi, M., Nakamura, M., Asahina, T., Mukai, T., Kanahashi, H., Higashi, K., 2000, "Effects of heat treatment on compressive properties of AZ91 Mg and SG91A Al foams with open-cell structure", *Advanced Engineering Materials*, 2000; Vol. 2, pp. 184-191.
- Yavuz, İ., 2010, "Metalik Köpük Malzemeler ve Uygulama Alanları", *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Vol. 1, pp. 49-58.

- Yu, J., Wang, E., Li, J., Zheng, Z., 2008, "Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams closed-cell aluminum-foam core in three-point bending", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 5, pp. 885–894.
- Zhang, L. P, Tao, X.F., Zhao Y.Y., 2009, "Al matrix syntactic foam fabricated with bimodal ceramic microspheres", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 2732–2736.
- Zhang, L.P., Zhao, Y.Y., 2007, "Mechanical Response of Al Matrix Syntactic Foams Produced by Pressure Infiltration Casting", *Journal of Composite Materials*, Vol. 41.
- Zhao, Y.Y., Fung, T., Zhang, L.P., Zhang, F.L., 2005, "Lost carbonate sintering process for manufacturing metal foams", *Scripta Materialia*, Vol. 52, pp. 295–298.
- Zhu, H. X., Windle, A. H., 2002, "Effects of cell irregularity on the high strain compression of open-cell foams", *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 1041–1052.



HİBRİD KONTROLLÜ TABAN İZOLASYONLU SİSTEMLERİN OPTİMİZASYONU

Serdar ULUSOY

Türk-Alman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL
serdar.ulusoym@tau.edu.tr

(Geliş/Received: 17.04.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 09.07.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, yüksek sönümlü kauçuk mesnet modeline aktif kontrol sistemi uygulanarak, hibrid kontrollü taban izolasyonlu sistemlerin darbe tipi titreşim içeren yakın fay etkisi altında davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, yapı tepkimelerindeki değişimin daha iyi irdelenmesi için hibrid kontrollü taban izolasyonlu yapı modelinin etkin titreşim periyodu sırasıyla 2.0, 3.0 ve 4.0 sn. ve her bir periyot için etkin sönüm oranı %20 ve %30 olarak alınmıştır. Taban izolasyonunun bulunduğu kata aktif tendonlar yerleştirilerek, deprem kaydının her adımı için tendonlara uygulanacak kontrol kuvveti ve oluşan yanal ötelemeler hesaplanmıştır. Orantı-İntegral-Türev (PID) kontrolcüsünün kontrol kuvvetine, yapının toplam kütesine bağlı olarak sınır konulmuştur. Kontrolcünün parametreleri ise öğretim-öğrenme tabanlı algoritma (TLBO) ile belirlenmiştir. Sonuç olarak hibrid kontrollü taban izolasyonlu yapı modellerinde yanal ötelemelerin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: *Taban izolasyon, Aktif kontrol, Öğretim-öğrenme tabanlı algoritma*

Optimization of Base Isolated Hybrid Control Systems

ABSTRACT: In this study, active control system is used for the high damping rubber bearing model and the behavior of base isolated hybrid control systems under the near-fault ground motions is investigated. In this context, in order to examine the change of the structure reactions, the effective vibration period and the effective damping rate for each period of base isolated hybrid control systems were taken as 2.0, 3.0 and 4.0 second and 20% and 30%, respectively. By placing the active tendons on the base of structures, the control forces and lateral displacements were calculated for each step of the earthquake record. The control force of the proportional-integral-derivative (PID) controller is limited depending on the total mass of the structure. The parameters of the controller were determined by teaching-learning based algorithm (TLBO). As a result, the lateral displacement of base isolated hybrid control systems is significantly reduced.

Key Words: *Base isolation, Active control, Teaching- Learning Based Algorithm.*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Stratejik önemi yüksek olan hastane vb. yapılarda, geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımı yerini taban izolasyonlu depreme dayanıklı yapı tasarımına bırakmıştır. Bu değişikliğin en önemli nedeni ise deprem esnasında ve sonrasında yapıların işlevlerini sürdürebilmeleri ve titreşime hassas cihazlarda maddi hasarların oluşmamasının istenmesidir. Ancak Northridge gibi yakın fay deprem hareketine maruz kalan sismik izolatörlü yapıların tabanında yüksek yanal ötelemeler meydana gelmiştir (Jangid ve Kelly, 2001). Oluşan bu yüksek yanal ötelemenin yıkıcı etkilerini ortadan kaldırmak için ise yapının tabanında ek sönümleyicilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sönümleyiciler pasif (viskoz sönümleyicisi), yarı aktif (manyetik rezonans sönümleyici) uygulandığı gibi hibrid kontrol (taban izolasyonlu sisteme aktif

kontrol sisteminin eklenmesiyle oluşan sistem) olarak ta uygulanmaktadır (Applied Technology Council, 1993). Pasif, semi aktif ve aktif sistemlerin uygulandığı birçok çalışma literatürde mevcuttur. Yakın fay deprem etkisi altındaki sağlık merkezinin güçlendirilmesi için yüksek sönümlü kauçuk mesnetleri ile birlikte pasif viskoz sönümleyicilerin kullanılması (Asher ve diğ., 1996), sürtünmeli sarkaç mesnet prensibine göre çalışan taban izolasyonlu yapıya sürtünmeye bağlı olarak değişkenlik gösteren sürtünmeli sönümleyiciler eklenmesi (Ribakov, 2010), üç farklı izolasyon sisteminin (elastomerik yay sönümleyiciyle paralel kayıcı sürtünmeli mesnetin kullanımı, kurşun çekirdekli kauçuk mesnetle paralel kayıcı sürtünmeli mesnetin kullanımı ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetle paralel kayıcı sürtünmeli mesnetin kullanımı) betonarme yapıya uygulanması (Cancellara ve Angelis, 2016) gibi taban kesme kuvvetini ve taban izolasyonundaki ötelemelerin azaltıldığı pratik alanda uygulamalar pasif sistemlere örnek verilebilir. Semi aktif sistemlere (akıllı sistemlere) ise daha çok deneysel yapılan bazı çalışmalar, sürtünmeli sarkaç mesnetli çerçeve sistemin semi aktif hidrolik sönümleyiciler ile kombine edilmesi (Madden ve diğ., 2002), manyetik rezonans sönümleyicileri üç farklı bulanık mantık kontrolcüsüyle yer değiştirme, hız ve ivmenin geri beslendiği, yüksek sönümlü kauçuk mesnetli yapı üzerindeki uygulama (Lin ve diğ., 2006) ve manyetik alan uygulaması ile yanal rijitliği kontrol edilebilir bir sisteme dönüştüğü manyetik rezonans elastomer mesnetin kayma modülü farklı iki materyal ile tasarlanması (Li ve diğ., 2013) örnek olarak gösterilebilir. Bu çalışmalar ile sistemlerin yakın ve uzak fay etkisi altındaki davranışları incelenmiş, analitik ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduklarını ve semi aktif izolasyon sistemlerin, yapının sismik performansının arttığı belirlenmiştir. Aktif kontrol sistemlerinin (hibrid kontrol sistemleri) kullanıldığı hibrid kontrollü taban izolasyonlu sistemler için yapılan çalışmalarda, kayan kipli kontrol sisteminin kauçuk mesnetli yapı modelinde önemli ölçüde başarılı olduğu (Zhao ve diğ., 2000), H2/LQG kontrolcülü aktif kontrolcüsünün yapısal tepkimeleri azalttığı (Johnson ve diğ., 1998) görülmüştür. Ayrıca Johnson ve arkadaşları, taban izolasyonlu yapı ile taban izolasyonu ile birlikte manyetik rezonans sıvı sönümleyicileri bir arada olduğu semi aktif sistemleri ve H2/LQG kontrolcülü hibrid kontrollü taban izolasyonlu sistemlerin davranışlarını kıyaslamışlardır. Semi aktif ve aktif kontrol sistemlerinin taban izolasyonlu sisteme göre yapısal tepkimelerde daha başarılı olduğunu saptamışlardır. Semi aktif kontrol sisteminde ihtiyaç duyulan kontrol kuvvetinin aktif kontrole nazaran daha düşük olduğu belirlemişlerdir.

Pasif sönümleyiciler düşük deprem kayıtları etkisi altında taban izolasyonunda oldukça yüksek rijitlik oluşturduklarından yapının hareketi kısıtlanmaktadır. Bu nedenle düşük deprem kayıtları etkisinde etkili bir kontrol sistemi oluşturulamamaktadır. Semi aktif kontrol sistemleri taban izolasyonlu sistemlerde en yaygın olarak kullanılan sistemleri oluşturmaktadır. Aktif sistemler ise diğer uygulamalara göre (pasif ve semi aktif kontrol sistemleri) yapı kontrolünde en yüksek enerji sönümleyen sistemlerdir. Bu çalışma ile daha fazla enerjiyi uygun kontrol kuvveti ile sönümleyen hibrid kontrollü taban izolasyonlu sistemin (PID Kontrolcülü sistemin, yüksek sönümlü kauçuk mesnetle kullanımı) kontrol kuvvetinin kapasitesi yapının toplam kütesinin %10 veya %15 kadar sınırlandırılarak, yakın fay etkisindeki depremlerde yapının tabanındaki deplasmanların güvenli bir aralıkta tutulması sağlanmıştır. Bu amaçla PID kontrolcüsünün parametrelerinin belirlenmesinde meta sezgisel algoritmalarından biri olan öğretme-öğrenme tabanlı algoritma kullanılmıştır. Böylelikle taban izolasyonundaki deplasmanların azaltılması aktif tendon sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Materyal (Material)

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetli yapı modeline uygulanan aktif kontrollü sistemin PID kontrolcüsünün modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Yapının birinci katında oluşan yanal öteleme değeri sensörler tarafından ölçülerek, uygulanması gereken kontrol kuvveti dinamik verenler tarafından belirlenir. Uygulanacak kontrol kuvveti tendonlar ile yapıya etki ettirilir. Bu durumda, Şekil 1 'de gösterilen F_1 ve F_2 kuvvetleri, deprem etkisi sonucu tendonlarda oluşan dinamik kuvvetleri göstermektedir. Statik yükleme etkisi altında kablolarda meydana gelen kuvvetin F kadar olduğu

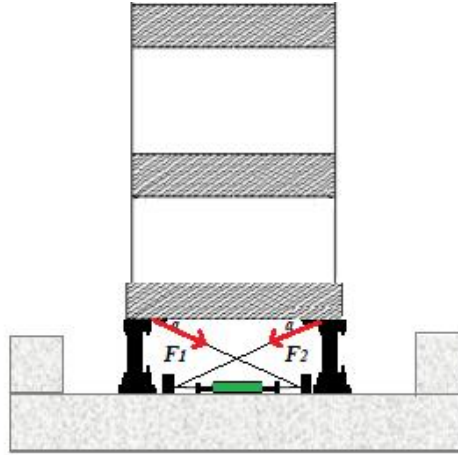
varsayılırsa, depremin $+x$ yönünde meydana gelmesi sonucu F_1 kuvveti $F-k_c u(t)$ olurken, F_2 kuvveti ise $F+k_c u(t)$ kadar olmaktadır. Ters yönde yani $-x$ yönünde gelmesi sonucunda ise F_1 kuvveti $F+k_c u(t)$ olurken, F_2 kuvveti ise $F-k_c u(t)$ kadar olmaktadır. Burada k_c yayların rijitlik değerini $u(t)$ ise kontrol sinyali değerini göstermektedir. PID kontrolcüsü, deprem etkisiyle birinci katta meydana gelen yanal ötelemeleri referans değeri ile karşılaştırır. Referans değeri sıfır olarak kabul edilerek taban katta yanal ötelemenin olmadığı varsayılır. Referans değeri ile sistemde gerçekte oluşan yanal ötelemenin farkı hata sinyalini $e(t)$ vermektedir. Yapıya etki eden kontrol sinyali değeri $u(t)$ ise Denklem 1 ile hesaplanır. Burada t zaman aralığını, K_p orantı katsayısını, T_i integral katsayısını, T_d Türev katsayısını ve $e(t)$ hata sinyali temsil etmektedir.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Hibrid kontrollü taban izolasyonlu yapı modelinin hareket denklemi ise Denklem 2'de verilmiştir. Burada k_c kablunun rijitlik katsayısını, α kabloların yatayla yaptığı açığı, $a(t)$ yapının ivme vektörünü, $v(t)$ yapının hız vektörünü, $x(t)$ yapının yer değiştirmesini, \dot{x}_g yerin ivmesini, $[1]$ birim vektörü, $u(t)$ kontrol sinyali vektörünü, $[M]$ yapının kütle matrisini, $[K]$ yapının rijitlik matrisini ve $[C]$ yapının sönüm matrisini göstermektedir. Denklem 3' te ise kontrol sinyalinin katlardaki değerleri verilmiştir. Sadece taban katında kontrolcü bulunduğu diğer katlarda bu değer sıfır olarak alınmıştır.

$$[M]a(t) + [C]v(t) + Ku(t) = -[M][1]\dot{x}_g - 4k_c \cos \alpha u(t) \quad (2)$$

$$u(t) = [u_{taban} \ 0 \ 0 \ 0 \dots] \quad (3)$$



Şekil 1. Hibrid kontrollü taban izolasyonlu sistem.

Figure 1 Base isolated hybrid control system

Metasezgisel algoritmalar, doğadaki olaylardan esinlenerek mühendislikte karşılaşılan karmaşık problemlerin amaç fonksiyonunu, tasarım değişkenlerini ($x_i = 1, \dots, n$) kullanarak kısa sürede en uygun değere getirmek için geliştirilmiş matematiksel ifadelerdir. İlk aşamada rastgele olarak belirlenen tasarım değişkenleri, optimizasyon süreci boyunca tasarım kısıtlamalarını dikkate alarak optimum değerlerine ulaşmaktadırlar. Bu sebeple meta sezgisel algoritmaların matematiksel ifadeleri farklılık gösterse de en iyi sonucu seçme ve rastlantısal seçim gibi özellikler tüm meta sezgisel algoritmaların yapısında mevcuttur (Yang, 2010). Bu çalışmada kullanılacak olan meta sezgisel algoritma Rao tarafından geliştirilen öğretme-öğrenme tabanlı meta sezgisel algoritmadır (Rao ve diğ., 2011). Bu algoritma bir sınıftaki konuyu en iyi bilen öğretmen, amaç fonksiyonunun çözümü olarak kabul edilir. Konu öğretmen tarafından öğrencilere aktarıldıktan sonra öğrenciler kendi aralarında gelişimlerini sürdürür ve konuya daha iyi hâkim olan öğrenci sınıfa yeni öğretmen olarak atanır. Öğretme-öğrenme algoritması iki fazdan (öğretme ve öğrenme

fazı) oluşmaktadır. Her iki fazın (öğretme ve öğrenme fazı) matematiksel ifadeleri sırasıyla denklem 4 ve 5 verilmiştir. Burada X_{yeni} yeni çözümü, $X_{ögrt}$ en iyi çözümü, X_{mev} i'nci tekrarlama sonucu oluşan tasarım değişkenini, TF 1 veya 2 değerini alan öğretim faktörünü, X_{ort} çözüm kümesindeki tüm elemanların ortalamalarını, rast (1) 0 ile 1 arasındaki rastgele değişen bir sayıyı, x_j^t ve x_k^t ise rastgele seçilmiş iki tasarım değişkeni ifade etmektedir. Öğretim öğrenme tabanlı metasezgisel algoritmanın akış şeması Şekil 2'de gösterilmiştir.

$$x_{yeni} = x_{mev} + rast(1)(x_{ögrt} - TFx_{ort}) \quad (4)$$

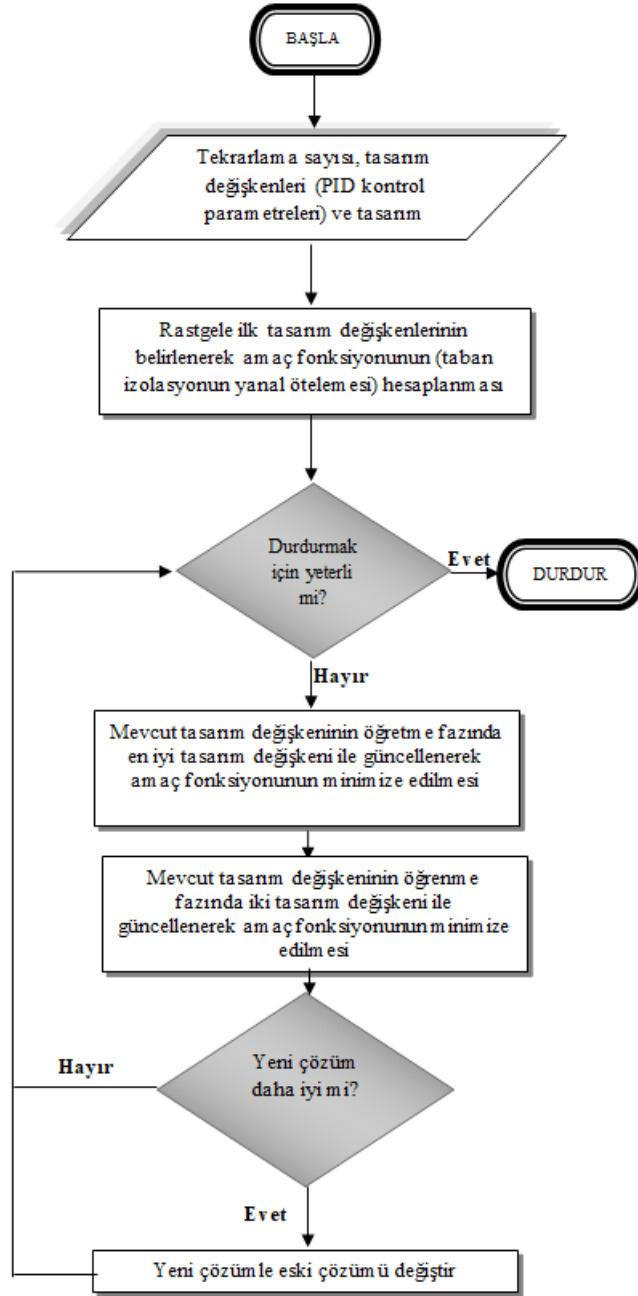
$$x_{yeni} = \begin{cases} x_{mev} + rast(1)(x_j^t - x_k^t) & \text{eğer } f(x_j^t) < f(x_k^t) \\ x_{mev} + rast(1)(x_k^t - x_j^t) & \text{eğer } f(x_k^t) < f(x_j^t) \end{cases} \quad (5)$$

Öğretim- öğrenme tabanlı algoritmanın optimizasyon işlem aşamaları şu şekilde özetlenir:

- Tekrarlama sayısı, tasarım değişkenleri (PID kontrol parametreleri) ve tasarım değişkenlerinin sınır aralığının belirlenmesi
- Rastgele ilk tasarım değişkenlerinin belirlenerek amaç fonksiyonunun (taban izolasyonunun yanıl ötelemesi) hesaplanması
- Optimizasyon sürecinin başlatılması
- Mevcut tasarım değişkeninin öğretim fazında en iyi tasarım değişkeni ile güncellenerek amaç fonksiyonunun minimize edilmesi
- Mevcut tasarım değişkeninin öğrenme fazında iki tasarım değişkeni ile güncellenerek amaç fonksiyonunun minimize edilmesi
- Optimizasyon sürecinin her tekrarlama için yapılması
- Optimizasyon sürecinin sonlandırılması

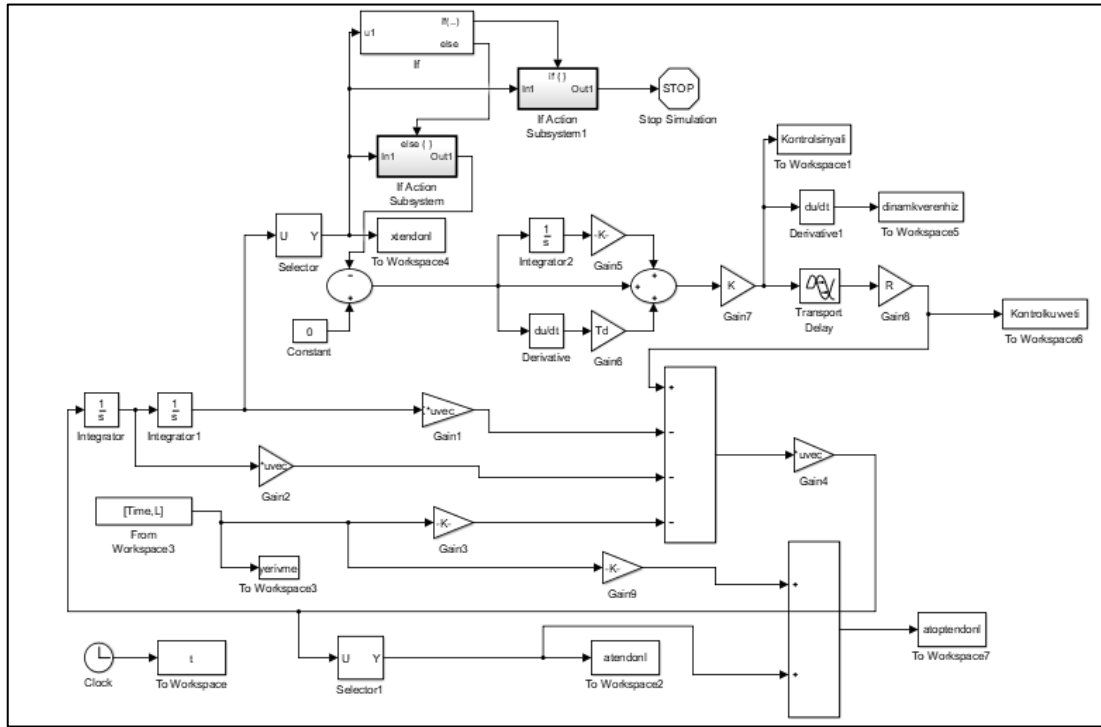
Yöntem (Method)

Çok serbest dereceli yapı modelinin optimizasyon sürecinde ve yapı tepkimelerinin elde edilmesinde Matlab programı (Matlab, 2015) ve bu programın alt bir programı olan Simulink programı (Simulink, 2015) kullanılmıştır. Öğretim- öğrenme tabanlı algoritmanın matematiksel ifadeleri, tasarım parametreleri, tasarım kısıtlamaları (kontrol kuvveti sınırı gibi), yapının matematiksel modeli ve yapıya etki eden yakın fay deprem kayıtları (FEMA P-695, 2009) için Matlab programından, oluşan diferansiyel denklemin çözümü nümerik çözümü için Simulink programında yer alan Runge-Kutta metodundan yararlanılmıştır. Çok serbest dereceli sistemin optimizasyon sürecindeki blok diyagramı Şekil 3'de gösterilmiştir. Yapının ivme değerinin integrali alınarak hız değerine, hız değerinin integrali alınarak yapıya yer değiştirme değerine ulaşılmıştır. Deprem kaydı, yapının rijitliği vb. değerler ise Matlab üzerinden okunarak, Simulink'e aktarılmıştır Tüm değerler Denklem 2'de yerine konarak Kütle, Rijitlik ve Sönüm matrisleriyle çarpılmıştır. Referans değeri sıfır alınarak hata sinyali bulunmuş ve Denklem 1'de verilen kontrol sinyali elde edilmiş ve yapıya kontrol kuvveti uygulanarak taban izolasyondaki deplasmanı azaltılmıştır. Öğretim- öğrenme tabanlı algoritması vasıtasıyla da bu değer en optimum olarak hesaplanmıştır. Kontrolcüde meydana gelen zaman gecikmesi değeri Nigdeli ve Boduroğlu'nun yaptığı çalışmadan 20 ms olarak alınmıştır (Nigdeli ve Boduroğlu, 2013).



Şekil 2. Öğretme- öğrenme tabanlı algoritmanın akış şeması

Figure 2 Flowchart of Teaching-Learning based Algorithm



Şekil 3. Hibrid Kontrollü taban izolasyonlu yapının optimizasyon sürecindeki blok diyagramı.

Figure 3 Block diagram of base isolated hybrid control structure in optimization process

NÜMERİK ÖRNEK (NUMERICAL EXAMPLE)

Bu çalışmada kullanılacak 10 katlı kontrolsüz yapı modeli Gaffarzadeh ve Younespour yaptığı çalışmadan alınmıştır (Ghaffarzadeh ve Younespour, 2014). Yapı modelinin tabanında izolasyon ve aktif kontrol bulunmadığı durumda Çizelge 1’de gösterilen darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem hareketlerinden 10. Kayıt 1. Bileşen (Northridge - Rinaldi Receiving Sta) en kritik kayıttır ve hibrid izolatörlü yapının yapısal tepkimelerinde, diğer kayıtlara kıyasla daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğundan bu kayıt optimizasyon sürecinde kullanılmıştır. Kontrolsüz yapının ivme değerleri düşürmek için kullanılan taban izolasyonu 6 farklı şekilde uygulanacaktır. Bu 6 farklı yapı modelinin etkin periyotları ve etkin sönüm oranları ise Çizelge 2’ de verilmiştir. Yapıya eklenen aktif tendonların yatayla yaptığı açı ve tendonların rijitliği Chung, Lin, Reinhorn ve Soong (1989) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır (Chung ve diğ., 1989). Bu değerler sırasıyla 36 derece ve 372100N/m’dir. Böylelikle oluşan yeni hibrid izolatörlü yapı modelinin sayısal değerleri Çizelge 3’te verilmiştir. Her model için etkin rijitlik ve etkin sönüm değerleri Denklem 6 ve 7 ile hesaplanmıştır. Burada m_{total} yapının toplam kütesini, T_{eff} yapının etkin periyodunu, ζ_{eff} yapının etkin sönüm oranını, k_{eff} taban izolasyonunun etkin rijitliğini ve c_{eff} taban izolasyonunun etkin sönümünü ifade etmektedir. Farklı yapı modelleri için öğretme- öğrenme tabanlı algoritmaya göre optimize edilen PID kontrolcü parametreleri ise Çizelge 4’te verilmiştir. Bu parametreler hibrid kontrollü taban izolasyonlu yapı modellerinde kullanıldığında, 28 farklı deprem kaydının yapısal tepkimeleri Çizelge 5’ten Çizelge 12’ye kadar ek bölümünde sunulmuştur. Kontrolsüz yapıya uygulanan taban izolasyonu, yapının ivmelerini azaltmış ama yapının tabanındaki deplasman artırmıştır. Uygun kontrol değeri sınırlandırmaları ile hibrid kontrollü taban izolasyon sisteminin taban deplasmanları 55 cm altına tutulmuştur.

$$k_{eff} = \left(\frac{2\pi}{T_{eff}}\right)^2 * m_{total} \quad (6)$$

$$c_{eff} = 2 * m_{total} * \left(\frac{2\pi}{T_{eff}}\right) * \xi_{eff} \quad (7)$$

Çizelge 1. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay yer hareketi depremleri.*Table 1. Near-fault Ground motions*

Earthquake No.	Earthquake Name	Recording Station	Year	Magnitude
1	Irpinia, Italy-01	Sturno	1980	6.9
2	Superstition Hills-02	Parachute Test Site	1987	6.5
3	Duzce, Turkey	Duzce	1999	7.1
4	Erzican, Turkey	Erzican	1992	6.7
5	Imperial Valley-06	El Centro Array #6	1979	6.5
6	Imperial Valley-06	El Centro Array #7	1979	6.5
7	Kocaeli, Turkey	Izmit	1999	7.5
8	Landers	Lucerne	1992	7.3
9	Cape Mendocino	Petrolia	1992	7.0
10	Northridge-01	01Rinaldi Receiving Sta	1994	6.7
11	Loma Prieta	Saratoga – Aloha	1989	6.9
12	Northridge-01	01 Sylmar - Olive View	1994	6.7
13	Chi-Chi, Taiwan	TCU065	1999	7.6
14	Chi-Chi, Taiwan	TCU102	1999	7.6

Çizelge 2. Taban izolasyonlu yapı modellerine ait etkin periyot ve sönüm oranı*Table 2. Effective Period and Damping ratio of base isolated Structures*

Model No.	Modelin Etkin Periyodu (sn)	Modelin Etkin sönüm Oranı (%)
1	2.0	20
2	2.0	30
3	3.0	20
4	3.0	30
5	4.0	20
6	4.0	30

Çizelge 3. Taban izolasyonlu yapı modellerinin kütle, rijitlik ve sönüm değerleri.*Table 3. Mass, stiffness and damping values of base isolated Structures*

Kat	Kütle (kg)	Rijitlik (N/m)	Sönüm (Ns/m)
Taban _{i,model}	105000	$k_{i, \text{eff}}$	$C_{i, \text{eff}}$
1-3	105000	170000000	754850
4-6	95000	160000000	708650
7-9	90000	140000000	623300
10	85000	110000000	620950

Çizelge 4. Hibrid kontrollü taban izolasyonlu yapı modellerinin Northridge depremi etkisinde optimum PID parametreleri.*Table 4. Optimum PID parameter of base isolated hybrid control structure under Northridge Earthquake*

Model	Kontrol Limiti (%)	K_p	T_d	T_i	Taban ötelemesi (cm)
1	10	-0.1162	4.9296	2.2466	30.43
2	10	-0.1308	4.5006	1.4670	27.37
3	10	-0.6304	1.0420	1.8794	37.39
4	10	-0.6380	1.0094	3.4283	34.19
5	15	-0.2118	4.8803	4.7742	36.52
6	15	-0.3066	3.3943	4.9705	34.34

BULGULAR (RESULTS)

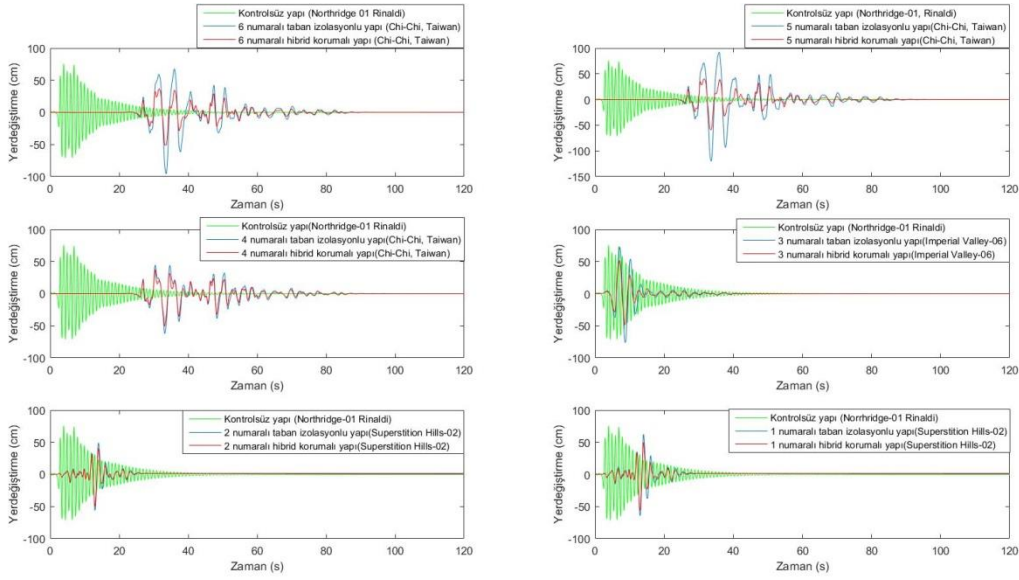
Yapılan bu çalışmada yapı modelinin farklı deprem kaydı etkisi altındaki maksimum yapısal tepkimeleri (yer değiştirme ve toplam ivme değerleri) Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. Taban izolasyonun ve aktif kontrol sisteminin bulunmadığı modelin 10. Kayıt 1. Bileşen (Nordridge-01, 01Rinaldi Receiving Sta) etkisi altında maksimum yer değiştirmesi 75.67 cm ve toplam ivmesi 37.38 m/s² olarak hesaplanmış ve zamana bağlı yapısal tepkimeleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir. İvme değerinin oldukça yüksek olması sebebiyle taban katta 6 farklı izolasyon sistemi uygulanmıştır. Her bir taban izolasyon modeli ve hibrid kontrol modeli tek başına incelendiğinde, 6 numaralı modelin taban izolasyonunda yanal ötelemenin ve toplam ivmenin en kritik kayıta 13. kayıt 1. bileşende (Chi-Chi, Taiwan, TCU065) 88.15 cm ve 2.93 m/s² olduğu ve bu değerlerin hibrid kontrolle 47.93 cm ve 2.67 m/s² indiği, 5 numaralı modelin taban izolasyonunda yanal ötelemenin ve toplam ivmenin en kritik kayıta 13. kayıt 1. bileşende (Chi-Chi, Taiwan, TCU065) 110.8 cm ve 3.15 m/s² olduğu ve yine bu değerlerin hibrid kontrolle 54.89 cm ve 2.72 m/s² indiği Şekil 4 ve 5'te görülmektedir. Etkin periyotları aynı olmasına rağmen etkin sönümleri farklı olan 4 ve 3 numaralı model için en kritik deprem kaydı sırasıyla 13. kayıt 1. bileşen (Chi-Chi, Taiwan, TCU065) ve 5. kayıt 2. bileşen (Imperial Valley-06, El Centro Array #6) olmuştur. Bu deprem kayıtları etkisi altında, 4 numaralı modelin taban izolasyonunda yanal ötelemenin ve toplam ivmenin 53.36 cm ve 2.77 m/s² olduğu ve bu değerlerin hibrid kontrolle 41.40 cm ve 2.85 m/s² getirildiği, 3 numaralı modelin ise taban izolasyonunda yanal ötelemenin ve toplam ivmenin 66.95 cm ve 3.34 m/s² olduğu ve bu değerlerin hibrid kontrolle 43.90 cm ve 3.07 m/s² getirildiği Şekil 4 ve 5'te görülmüştür. Son olarak ise 2 numaralı ve 1 numaralı model incelendiğinde, taban izolasyonunda yanal ötelemenin 2 ve 1 numaralı modeller için en kritik deprem kaydında 2. kayıt 1 bileşen (Superstition Hills-02, Parachute Test Site) 40.88 cm ve 47.50 cm olduğu ve bu değerlerin hibrid kontrolle sırasıyla 35.54 cm ve 40.84 cm düştüğü Şekil 4 ve 5 ile tespit edilmiştir.

Her modelin taban izolasyonunda yanal ötelemenin 55 cm altına inmesi hedeflenmiştir. Bu şartı sağlayan 1-4 numaralı modellere %10'luk kontrol kuvveti limitinin uygulanması uygun görülürken 5 ve 6 numaralı modellere % 15'lik kontrol kuvveti limiti uygun görülmüştür. Kontrolsüz, Taban İzolasyonlu ve Hibrid kontrollü yapı modellerinin maksimum yapı tepkimeleri Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Kontrolsüz, Taban İzolasyonlu ve hibrid kontrollü yapı modellerinin en kritik kayıt etkisi altında maksimum yapısal tepkimeleri

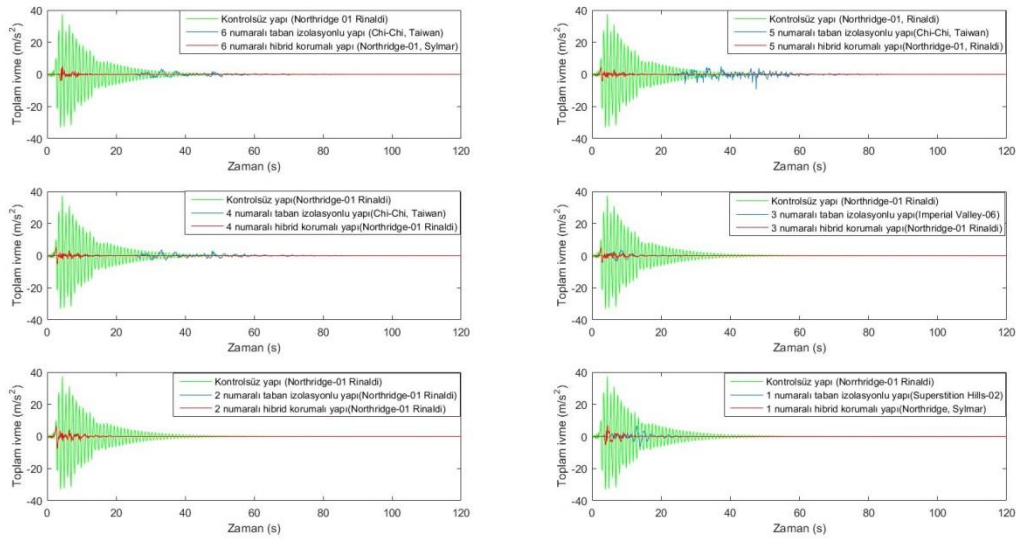
Table 5. The maximum structural responses of uncontrolled structure, base isolated structure and hybrid controlled structure under critical excitation.

Model	Maksimum yerdeğiştirme (cm)	Maksimum toplam ivme (m/s ²)
Kontrolsüz yapı	75.67	37.38
Taban izolasyonlu 1 numaralı yapı	64.26	6.54
Taban izolasyonlu 2 numaralı yapı	56.07	6.78
Taban İzolasyonlu 3 numaralı yapı	76.13	4.18
Taban izlasyonlu 4 numaralı yapı	62.21	4.57
Taban izolasyonlu 5 numaralı yapı	119.7	3.54
Taban izolasyonlu 6 numaralı yapı	95.65	3.41
Hibrid kontrollü 1 numaralı yapı	56.54	7.12
Hibrid kontrollü 2 numaralı yapı	50.14	7.89
Hibrid kontrollü 3 numaralı yapı	55.71	5.17
Hibrid kontrollü 4 numaralı yapı	50.61	5.42
Hibrid kontrollü 5 numaralı yapı	59.01	4.56
Hibrid Kontrollü 6 numaralı yapı	51.52	4.99



Şekil 4. En kritik deprem etkisi altında yapı modellerinin en üst katının zaman- yer değiştirme grafiği

Figure 4 The time history of top Displacement of structures under critical excitation



Şekil 5. En kritik deprem etkisi altında yapı modellerinin en üst katının zaman- toplam ivme grafiği

Figure 5 The time history of top total acceleration of structures under critical excitation

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kontrolsüz yapı modelinde meydana gelen yüksek toplam ivme değerlerinin azaltılması için yapı modeline, farklı sönüm oranlarına sahip yüksek sönümlü kauçuk mesnet ilave edilerek farklı periyotlardaki yapı modelinin toplam ivme değerleri azaltılmıştır. Bu ivme değerleri 37.38 m/s^2 den 3.41 m/s^2 kadar taban izolasyonla azaltılmıştır. Ancak azalan bu ivme değerlerine karşı taban izolasyonda meydana gelen yüksek yanal ötelemeler izolasyon sisteminde yırtılmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle yanal ötelemelerin azaltılması için hibrid kontrol sistemi (taban izolasyonlu sistem ile birlikte aktif kontrol sisteminin kullanılması) uygulanmıştır. Böylece taban taban izolasyonda meydana gelen maksimum yanal

ötelemeler 110.8 cm'den 54.89 cm düşürülmüştür. Bu çalışma sonucunda aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Taban izolasyonlu hibrid kontrollü sistemlerde toplam ivme ve taban yanal ötelemelerinin önemli ölçüde azaltıldığı
- Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetine uygun sınırlandırma getirilerek, bu sistemlerin taban izolasyonlu sistemlere uygulanabileceği
- Meta sezgisel algoritmaların taban izolasyonlu hibrid kontrollü sistemlerde kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde kısa sürede etkili olduğu
- Teorik ve pratik alandaki sismik izolasyonlu uygulamalara katkı sağlayacağı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Applied Technology Council 17-1., 1993, "Proceedings on seismic isolation, passive energy dissipation, and active control" Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Asher J.W., Young R.P., Ewing R.D., 1996, "Seismic isolation design of the San Bernardino county medical center replacement Project". The Structural Design of Tall Buildings, Vol 5, 265-279.
- Cancellara D., Angelis F.D., 2016, "Nonlinear dynamic analysis for multi-storey RC structures with hybrid base isolation systems in presence of bi-directional ground motions" Composite Structures, 154, 464-492.
- Chung L.L., Lin R.C., Reinhorn A.M., Soong T.T., 1989, "Experimental Study of Active Control for MDOF Seismic Structures". Journal of Structural Engineering (ASCE), 115, 1609-1627.
- FEMA P-695., 2009, "Quantification of Building Seismic Performance Factors" Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- Ghaffarzadeh H., Younespour A., 2014, "Active Tendons Control of Structures Using Block Pulse Functions". Structural Control and Health Monitoring, 21, 1453-1464.
- Jangid R.S., Kelly J.M., 2001, "Base isolation for near-fault motions". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30, 691-707.
- Johnson E.A., Ramallo J.C., Spencer B.F., Sain M.K., 1998 "Intelligent base isolation systems". 2th World Conference on structural Control, Japan, June 28-July 1.
- Li J., Li Y., Samali B., 2013, "Development of adaptive seismic isolators for ultimate seismic protection of civil structure". Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems, pp. 1-12.
- Lin P.Y., Roschke P.N., Loh C.H., 2006, "Hybrid base-isolation with magnetorheological damper and fuzzy control". Structural Control and Health Monitoring, 14, 384-405.
- Madden G.J., Symans M.D., Wongprasert N., 2002, "Experimental verification of seismic response of building frame with adaptive sliding base-isolation system". Journal of Structural Engineering, Vol 128, No.8.
- MathWorks Inc., 2015, "MATLAB R2015b.Natick". MA, USA.
- Nigdeli S.M., Boduroğlu B.H., 2013, "Active Tendon Control of Torsionally Irregular Structures under Near-Fault Ground Motion Excitation". Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28, 718-736.
- Rao R.V., Savsani V.J., Vakharia D.P., 2011, "Teaching-learning-based optimization a novel method for constrained mechanical design optimization problems". Computer-Aided Design, 43(3), 303-315.
- Ribakov Y., 2010, "Reduction of structural response to near fault earthquakes by seismic isolation columns and variable friction dampers". Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 9, 113-122.
- Simulink., 2015, "MATLAB R2015b.Natick". MA, USA.
- Yang X.S., 2010, "Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications". John Wiley&Sons.

Zhao B., Lu X., Wu M., Mei Z., 2000, "Sliding mode control of buildings with base-isolation hybrid protective system". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29, 315-326.

Ek (Appendix)

Çizelge 6. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 6 numaralı yapının %15'lik kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.

Table 6. The maximum structural responses of structure number 6 under near fault ground motions with 15% control limit.

D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	14.08	15.35	11.24	12.64	0.73	0.91	1.18	1.56	33.01	397.5
	2	38.80	42.12	22.93	25.24	1.28	1.36	1.37	1.75	52.55	632.8
2	1	50.28	55.19	36.78	39.69	1.98	2.25	2.61	3.58	116.9	1480
	2	20.61	21.75	13.41	15.11	0.86	1.31	1.49	1.94	42.51	511.9
3	1	30.26	32.61	17.03	19.35	1.55	1.73	1.82	2.23	44.89	540.5
	2	49.41	53.70	32.19	36.29	1.56	1.87	2.01	3.25	53.38	642.8
4	1	26.16	28.41	19.90	22.81	1.62	2.00	2.83	2.94	59.36	714.8
	2	32.91	35.82	26.45	29.15	1.35	1.66	1.78	3.42	86.48	1041
5	1	40.11	43.63	26.29	29.23	1.25	1.90	2.07	2.45	53.22	640.8
	2	72.83	78.16	41.48	45.95	2.52	2.96	2.55	2.66	78.49	945.1
6	1	25.69	27.75	15.49	17.12	0.83	1.12	1.00	2.17	36.63	441.0
	2	57.47	62.16	32.07	36.81	1.78	1.93	2.34	3.44	68.97	830.5
7	1	16.29	18.03	9.810	10.94	0.72	0.89	1.10	1.29	35.57	428.4
	2	11.92	12.97	6.970	7.390	0.78	0.81	0.97	1.12	19.20	231.2
8	1	65.43	70.94	37.71	40.92	2.85	2.73	3.37	2.70	84.66	101.9
	2	17.30	18.87	9.950	11.63	1.32	1.11	2.55	1.87	26.00	313.0
9	1	12.36	14.08	9.790	13.71	1.43	1.61	2.56	3.03	42.54	512.2
	2	28.09	33.16	21.25	27.66	2.14	2.92	2.93	3.93	87.69	1056
10	1	43.47	49.79	34.34	43.94	1.96	3.37	2.94	4.92	129.3	1557
	2	25.75	29.00	20.76	24.22	1.50	1.98	2.35	3.04	70.98	854.7
11	1	15.73	17.24	12.77	14.12	1.34	1.42	1.84	2.41	43.94	529.1
	2	26.91	29.50	14.87	16.60	1.40	1.33	1.72	1.57	30.21	363.8
12	1	27.11	30.89	20.75	25.86	1.40	2.12	2.40	3.73	63.60	765.8
	2	37.03	37.94	27.61	33.87	2.50	2.93	3.96	4.99	100.9	1215
13	1	88.15	95.65	47.93	51.52	2.93	3.41	2.67	3.99	90.06	1085
	2	50.00	49.96	31.72	34.21	2.12	2.65	2.38	3.86	83.39	1004
14	1	56.43	60.95	30.83	33.58	1.56	1.66	1.79	2.17	64.53	777.1
	2	50.41	54.69	29.44	33.13	1.55	1.80	1.53	1.68	64.95	782.1

Çizelge 7. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 5 numaralı yapının %15'lik kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.**Table 7.** The maximum structural responses of structure number 5 under near fault ground motions with 15% control limit.

D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	15.24	16.64	11.92	13.27	0.67	0.73	1.10	1.43	34.24	412.3
	2	46.79	50.69	26.00	28.64	1.26	1.47	1.36	1.62	57.77	695.7
2	1	55.60	60.91	39.87	43.58	1.87	1.98	2.37	3.32	120.4	1450
	2	24.45	26.16	14.48	15.92	0.86	1.13	1.33	1.75	43.46	523.3
3	1	37.52	40.35	19.38	21.65	1.53	1.71	1.79	2.12	47.66	573.9
	2	56.88	61.54	35.66	39.84	1.57	1.82	1.91	2.91	59.77	719.7
4	1	32.81	35.57	21.48	23.87	1.18	1.56	2.60	2.80	63.74	767.6
	2	35.67	38.80	28.05	30.73	1.23	1.34	1.71	3.02	89.06	1072
5	1	46.72	50.80	29.25	32.28	1.31	1.66	1.92	2.36	57.37	690.8
	2	88.35	95.03	47.45	51.79	2.47	3.08	2.60	2.72	85.05	1024
6	1	30.08	32.54	17.54	19.27	0.85	0.92	0.95	1.94	37.70	454.0
	2	71.33	77.09	35.88	40.31	1.90	2.03	2.25	3.10	72.86	877.3
7	1	19.69	21.49	11.18	12.46	0.72	0.83	1.02	1.21	36.83	443.4
	2	15.07	16.36	7.840	8.170	0.70	0.76	0.94	1.05	20.36	245.1
8	1	79.53	85.91	42.71	46.48	2.68	2.80	3.29	2.72	90.57	1091
	2	21.22	22.99	11.30	13.05	1.03	0.98	2.37	1.66	28.31	340.8
9	1	14.42	15.72	10.27	13.86	1.15	1.35	2.31	2.66	44.38	534.5
	2	32.90	37.62	22.11	27.30	1.87	2.52	2.78	3.72	90.80	1093
10	1	46.95	52.68	36.52	45.46	1.63	2.91	2.73	4.56	129.5	1559
	2	26.84	30.00	22.32	25.84	1.27	1.72	2.11	2.84	72.48	872.8
11	1	17.36	19.08	13.48	14.91	1.12	1.08	1.76	2.19	45.62	549.4
	2	33.82	36.90	16.97	18.84	1.31	1.37	1.69	1.47	33.10	398.6
12	1	29.31	32.72	22.49	27.45	1.25	1.88	2.16	3.38	64.10	771.8
	2	40.78	42.63	29.76	34.80	2.03	2.49	3.72	4.37	103.3	1244
13	1	110.8	119.7	54.89	59.01	3.15	3.54	2.72	3.65	97.88	1179
	2	51.78	56.28	34.55	37.37	2.03	2.31	2.35	3.57	90.30	1087
14	1	68.67	74.18	35.63	38.68	1.79	1.83	1.71	1.96	70.03	843.3
	2	60.30	65.22	33.59	37.48	1.55	1.91	1.57	1.63	70.94	854.2

Çizelge 8. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 4 numaralı yapının %10'luk kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.

Table 8. The maximum structural responses of structure number 4 under near fault ground motions with 10% control limit.

D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	13.93	15.68	11.20	13.45	1.11	1.30	1.13	1.55	22.48	270.7
	2	31.34	35.59	22.69	26.84	1.66	1.98	1.54	2.06	38.57	464.4
2	1	48.38	54.86	40.69	47.27	2.77	3.52	3.00	4.38	81.78	984.7
	2	16.79	19.42	13.82	16.68	1.36	1.66	1.41	1.85	28.94	348.5
3	1	15.58	22.21	15.07	18.25	1.76	1.97	1.86	2.25	27.72	333.8
	2	33.70	39.19	26.81	32.14	1.77	2.32	2.09	3.29	37.98	457.3
4	1	26.70	30.74	21.94	27.18	2.09	2.50	2.80	3.00	41.84	503.8
	2	33.78	38.62	28.79	34.32	1.96	2.44	2.07	3.48	59.08	711.4
5	1	35.03	40.09	26.27	31.32	1.94	2.60	2.32	2.72	42.00	505.6
	2	52.19	60.21	37.76	44.31	3.09	3.10	2.86	3.12	54.33	654.2
6	1	21.48	24.72	16.15	19.04	1.06	1.69	1.08	2.33	25.27	304.3
	2	40.22	46.10	27.53	32.58	2.31	2.71	2.57	3.61	49.61	597.4
7	1	13.22	15.14	10.58	12.68	1.03	1.17	1.21	1.38	24.18	291.1
	2	8.550	9.890	6.550	8.150	0.89	1.02	1.00	1.14	12.58	151.5
8	1	45.80	53.07	35.60	42.10	3.29	2.85	3.42	3.14	54.48	656.0
	2	11.94	14.04	8.680	10.51	1.65	1.40	2.25	2.00	18.48	222.6
9	1	12.91	15.60	10.50	15.10	1.85	2.10	2.49	2.90	27.55	331.8
	2	26.13	31.94	23.52	31.14	2.70	3.33	3.01	3.85	58.94	709.7
10	1	39.98	49.68	34.19	45.80	2.72	4.57	3.28	5.42	85.81	1033
	2	30.15	35.26	23.25	27.73	2.24	2.78	2.53	3.47	47.59	573.0
11	1	16.13	18.47	14.02	16.26	1.73	1.98	1.96	2.55	30.35	365.5
	2	19.12	21.45	13.90	15.96	1.58	1.45	1.71	1.69	19.63	236.4
12	1	30.25	36.66	23.09	29.49	2.10	2.89	2.29	3.71	47.15	567.8
	2	36.97	43.66	31.55	36.96	3.51	3.64	4.29	5.31	66.57	801.6
13	1	53.36	62.21	41.40	50.61	2.77	3.71	2.85	4.22	55.60	669.3
	2	34.39	39.92	26.10	31.21	2.24	3.03	2.46	3.82	55.97	674.0
14	1	38.81	44.42	28.66	33.17	1.90	1.95	1.92	2.46	45.07	542.7
	2	41.35	47.71	31.11	36.47	2.09	2.17	1.94	2.28	45.81	551.6

Çizelge 9. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 3 numaralı yapının %10'luk kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.

Table 9. The maximum structural responses of structure number 3 under near fault ground motions with 10% control limit.

D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	18.57	21.23	12.71	14.88	1.19	1.34	1.16	1.43	24.82	298.8
	2	38.78	44.15	26.71	31.79	1.81	2.10	1.69	2.11	46.20	556.3
2	1	55.86	63.78	45.67	52.95	2.91	3.28	2.97	4.23	88.24	1063
	2	20.84	23.80	15.23	18.24	1.34	1.60	1.46	1.74	31.00	373.2
3	1	22.88	26.01	17.10	20.66	1.68	1.79	1.84	2.15	30.10	362.4
	2	37.01	42.86	29.18	34.92	1.77	2.10	1.97	2.86	44.65	537.6
4	1	30.91	35.23	24.93	30.39	1.61	2.20	2.49	2.85	47.66	574.0
	2	40.35	45.71	33.10	39.38	2.15	2.33	2.04	2.99	63.22	761.3
5	1	42.01	47.97	30.35	36.19	1.81	2.57	2.22	2.76	49.44	595.3
	2	66.95	76.13	43.90	51.85	3.34	3.61	3.07	3.31	61.72	743.2
6	1	26.15	29.93	19.06	22.64	1.24	1.37	1.10	2.08	26.92	324.1
	2	51.18	58.60	33.57	39.57	2.40	2.52	2.52	3.24	55.76	671.4
7	1	16.13	18.44	12.01	14.63	0.94	1.17	1.16	1.27	25.84	311.2
	2	9.880	11.59	7.130	9.370	0.80	0.97	0.95	1.12	13.21	159.1
8	1	54.10	62.38	40.24	48.13	3.22	2.92	3.36	3.02	59.81	720.2
	2	14.17	16.46	9.850	11.90	1.27	1.27	1.92	1.79	21.35	257.1
9	1	16.76	19.65	11.63	15.78	1.46	1.65	2.14	2.53	29.56	356.0
	2	29.11	34.00	25.43	32.81	2.54	3.03	2.92	3.61	63.26	761.7
10	1	44.10	53.34	37.39	48.45	2.43	4.18	3.08	5.17	87.72	1056
	2	36.90	42.91	27.49	32.77	2.17	2.56	2.41	3.32	53.30	642.0
11	1	18.01	20.68	15.46	18.07	1.56	1.63	1.89	2.32	32.95	396.8
	2	22.97	25.79	15.60	18.26	1.52	1.44	1.66	1.59	21.71	261.4
12	1	37.00	44.00	27.12	34.14	2.15	2.98	2.27	3.26	51.25	617.1
	2	42.92	50.61	35.80	42.66	3.06	3.54	4.14	4.64	71.38	859.5
13	1	58.66	67.97	45.51	55.71	2.77	3.58	2.87	3.90	65.35	787.0
	2	44.04	50.72	30.35	36.24	2.12	2.68	2.38	3.42	62.12	748.0
14	1	47.20	53.90	33.66	39.65	2.10	2.26	1.93	2.30	51.41	619.0
	2	49.65	57.15	36.78	43.61	2.27	2.55	2.15	2.42	53.35	642.4

Çizelge 10. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 2 numaralı yapının %10'luk kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.

Table 10. The maximum structural responses of structure number 2 under near fault ground motions with 10% control limit.



D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	11.02	14.83	9.250	13.20	1.41	1.82	1.46	2.07	21.81	262.6
	2	17.08	23.51	14.21	20.05	1.73	2.48	1.60	2.44	21.39	257.6
2	1	40.88	56.07	35.54	50.14	4.15	6.29	4.28	6.29	66.98	806.6
	2	12.81	18.15	10.94	15.43	1.52	2.03	1.77	2.42	19.65	236.6
3	1	13.82	18.00	11.61	15.30	1.89	2.35	2.11	2.83	22.26	268.0
	2	20.26	27.68	16.24	22.62	2.30	3.75	2.36	4.39	30.36	365.6
4	1	19.61	27.40	16.35	23.62	2.95	3.26	3.35	3.29	30.06	362.0
	2	31.67	43.35	26.19	36.54	3.19	4.34	3.13	4.66	43.04	518.3
5	1	21.94	29.58	17.67	24.16	2.58	3.07	2.64	3.10	33.34	401.5
	2	27.40	37.14	23.50	32.17	3.41	3.90	3.40	4.30	35.14	423.2
6	1	12.33	16.30	10.15	14.41	1.42	2.92	1.44	3.19	22.78	274.3
	2	24.94	32.60	20.56	27.03	3.05	4.18	2.89	4.67	38.46	463.1
7	1	11.02	14.18	9.490	12.88	1.49	1.95	1.46	2.03	20.54	247.3
	2	5.780	8.060	5.140	7.700	1.16	1.34	1.14	1.43	10.80	130.1
8	1	25.50	33.94	23.17	31.08	3.31	3.73	3.40	4.06	36.87	443.9
	2	7.700	10.62	6.500	9.110	2.32	2.28	2.77	2.58	14.37	173.0
9	1	9.320	15.14	8.570	14.84	2.64	3.06	3.02	3.72	20.51	247.0
	2	22.91	34.00	20.66	32.13	3.35	4.80	3.29	5.06	41.08	494.6
10	1	30.09	43.94	27.37	41.66	3.90	6.86	4.10	7.89	82.51	993.6
	2	23.66	31.53	19.02	25.86	3.23	4.52	3.56	4.48	37.04	446.1
11	1	14.00	19.43	11.72	16.87	2.08	2.99	2.10	3.21	23.59	284.0
	2	10.25	12.98	9.150	11.96	1.59	1.87	1.76	1.94	15.47	186.3
12	1	22.70	29.62	18.72	24.57	3.04	4.08	2.90	4.65	40.75	490.7
	2	33.76	43.58	29.32	38.92	5.17	6.78	5.20	7.78	67.01	806.9
13	1	28.72	38.25	24.23	34.06	3.22	4.77	3.15	5.45	35.46	427.0
	2	27.29	37.85	23.53	33.54	2.84	4.38	2.89	4.94	39.29	473.0
14	1	26.81	35.92	22.37	30.36	2.48	3.44	2.38	3.40	36.90	444.3
	2	25.69	34.44	20.90	28.38	2.41	3.09	2.17	2.78	32.21	387.9

Çizelge 11. Darbe tipi titreşim içeren yakın fay deprem etkisi altındaki 1 numaralı yapının %10'luk kontrol kuvvet limiti ile oluşan maksimum yapı tepkimeleri.*Table 11.* The maximum structural responses of structure number 1 under near fault ground motions with 10% control limit.

D	Bileşen	Yer değiştirme (cm)				Toplam İvme (m/s ²)				Kontrol sinyali (cm)	Kontrol kuvveti (KN)
		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Taban izolasyon		Hibrid kontrol		Kontrollü	Kontrollü
		Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	10.kat	Taban	Taban
1	1	13.44	18.16	11.08	14.93	1.49	1.71	1.45	1.85	23.63	284.6
	2	20.72	28.03	16.71	23.18	1.94	2.62	1.73	2.49	25.26	304.2
2	1	47.50	64.26	40.84	56.54	4.35	6.54	4.25	6.48	73.03	879.4
	2	15.71	21.82	12.80	18.25	1.43	2.15	1.57	2.13	22.20	267.4
3	1	16.58	21.67	13.71	17.97	1.79	2.30	1.95	2.44	22.72	273.6
	2	26.09	35.26	20.14	27.69	2.30	3.41	2.34	3.90	35.00	421.3
4	1	23.78	32.45	19.38	27.23	2.53	3.37	3.05	3.30	34.38	414.0
	2	38.96	52.79	31.61	43.57	3.40	4.96	3.28	4.42	48.47	583.7
5	1	27.87	37.21	21.80	29.50	2.69	3.27	2.60	3.17	38.00	457.5
	2	32.10	43.20	27.23	37.04	3.50	4.05	3.48	4.04	38.14	459.3
6	1	15.42	20.34	12.16	16.14	1.65	2.67	1.41	3.00	24.94	300.3
	2	30.85	40.43	24.89	32.66	3.33	3.84	3.11	4.28	43.40	522.6
7	1	13.03	16.82	11.01	14.37	1.54	1.92	1.50	2.01	22.51	271.0
	2	7.250	9.940	5.750	8.150	1.19	1.27	1.18	1.38	11.77	141.7
8	1	27.80	36.90	25.28	33.86	3.21	3.47	3.31	3.80	37.87	456.0
	2	9.140	12.53	7.620	10.58	1.73	2.00	2.29	2.35	15.73	189.4
9	1	10.07	15.69	9.240	15.24	2.19	2.51	2.65	3.10	21.09	253.9
	2	26.00	36.68	22.82	34.21	3.44	4.62	3.44	4.88	43.67	525.9
10	1	34.17	46.79	30.43	44.00	4.00	6.16	3.94	7.07	86.14	1037
	2	30.90	40.81	23.47	31.46	3.19	4.59	3.33	4.62	39.33	473.6
11	1	17.20	23.49	14.07	19.71	2.05	2.79	2.08	3.03	27.13	326.7
	2	11.41	14.52	10.14	13.00	1.45	1.80	1.64	1.89	17.57	211.6
12	1	28.60	37.50	22.63	29.70	3.33	3.53	3.08	4.20	45.00	541.9
	2	39.57	50.59	33.83	43.99	5.20	6.44	5.34	7.12	71.62	862.4
13	1	36.53	48.52	28.78	38.39	3.63	4.33	3.25	4.86	42.93	517.0
	2	31.50	43.08	27.40	38.32	2.76	4.66	2.93	4.46	44.49	535.7
14	1	32.60	43.41	26.77	36.07	2.89	3.80	2.53	3.53	42.03	506.1
	2	32.07	42.80	25.36	34.20	2.87	3.66	2.43	3.12	39.38	474.2



SYNTHESIS OF QUASI-SPHERICAL SILVER NANOPARTICLES BY CHEMICAL REDUCTION ROUTE USING DIFFERENT REDUCING AGENTS

¹Ayşe KURT , ²Yasemin ÇELİK 

¹Graduate School of Sciences, Nanotechnology Program, Eskisehir Technical University, Eskisehir, TURKEY

²Department of Materials Science and Engineering, Eskisehir Technical University, Eskisehir, TURKEY
aysekurt@eskisehir.edu.tr, ybozkaya@eskisehir.edu.tr

(Geliş/Received: 08.03.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.07.2020)

ABSTRACT: Silver nanoparticles (AgNPs) have a great potential for molecular detection applications such as surface enhanced Raman spectroscopy (SERS) thanks to their surface plasmon resonance (SPR) property. SPR of AgNPs are closely related to the size, size distribution, aggregation state and shape of these particles. Therefore, in order to obtain optimum enhancement of SERS signals, it is crucial to be able to synthesize AgNPs with controllable size and shape. In this study, AgNPs were synthesized by chemical reduction method using three different reducing agents: trisodium citrate (TSC), ascorbic acid (AA) and hydroxylamine hydrochloride (HH). The synthesized AgNPs were compared in terms of their particle shape, size, size distribution and aggregation state. Accordingly, using 34 mM TSC as a reducing agent resulted in mostly quasi-spherical nanoparticles with an average size of 71.6 ± 20.9 nm. However, some nanorods and triangular nanoparticles were also observed in this sample. In case of using HH as reducing agent, the addition sequence of chemicals into the reaction mixture affected the size and the aggregation state of AgNPs significantly. A bimodal size distribution of mostly quasi-spherical nanoparticles with average sizes of 8.1 ± 4.1 and 60.1 ± 21.5 nm were obtained when HH/NaOH solution was added to AgNO_3 . When AA was used as a reducing agent, relatively larger quasi-spherical AgNPs with a lower polydispersity and an average size of 78.0 ± 22.2 nm were synthesized.

Key Words: Silver nanoparticles, Chemical reduction method, Surface enhanced Raman spectroscopy

Yarı Küresel Gümüş Nanopartiküllerin Farklı İndirgeyiciler Kullanarak Kimyasal İndirgeme Yöntemiyle Sentezi

ÖZ: Gümüş nanopartiküller, yüzey plazmon rezonans özellikleri sayesinde yüzeyde güçlendirilmiş Raman spektroskopisi (SERS) gibi moleküler tespit uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir. Gümüş nanopartiküllerin yüzey plazmon rezonansı tane boyutu, boyut dağılımı, agregasyon derecesi ve tane şekli ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle, SERS sinyallerinde optimum güçlendirmenin elde edilebilmesi için gümüş nanopartiküllerin şekil ve boyut kontrollü sentezi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, gümüş nanopartiküller üç farklı indirgeyici (trisodyum sitrat (TSC), askorbik asit (AA) and hidroksilamin hidroklorür (HH)) kullanarak kimyasal indirgeme yoluyla sentezlenmiştir. Sentezlenen gümüş nanopartiküller, tane şekli, boyutu, boyut dağılımı ve agregasyon/aglomerasyon derecesi açısından karşılaştırılmıştır. Buna göre, 34 mM TSC'nin indirgeyici olarak kullanıldığı durumda çoğunlukla yarı-küresel şekilli, ortalama tane boyutu 71.6 ± 20.9 nm olan gümüş nanopartiküller elde edilmiştir. Bununla birlikte, yarı-küresel tanelerin yanı sıra, az sayıda da olsa nano-çubuk ve üçgensel nanopartiküller olduğu da görülmüştür. İndirgeyici olarak HH kullanıldığında, kimyasalların reaksiyon karışımına eklenme sıralaması nanopartiküllerin tane boyutunu ve aglomerasyon derecesini önemli ölçüde etkilemiştir. HH/NaOH çözeltilisinin AgNO_3 çözeltilisi üzerine eklenmesi durumunda, ortalama tane

boyutu 8.1 ± 4.1 ve 60.1 ± 21.5 nm olan iki farklı tane boyut dağılımına sahip yarı-küresel gümüş nanopartiküller elde edilmiştir. İndirgeyici olarak AA kullanıldığında ise, diğer numunelere kıyasla nispeten daha büyük ortalama tane boyutuna (78.0 ± 22.2 nm); ancak, daha dar tane boyut dağılımına sahip yarı-küresel gümüş nanopartiküller sentezlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Gümüş nanopartiküller, Kimyasal indirgeme metodu, Yüzeyde güçlendirilmiş Raman spektroskopisi

1. INTRODUCTION

Silver nanoparticles (AgNPs) are promising for a wide range of applications, such as catalysis, biomaterials, optical devices, plasmonics, and sensing and detection of molecules (Zhang et al. 2016; Xu et al. 2006), due to their favorable combination of physical and chemical properties, such as catalytic and antimicrobial activities, high electrical and thermal conductivities, and exhibiting a surface plasmon resonance (SPR) (Roy et al. 2019; Lee and Jun 2019; Amendola 2016). SPR is an optical phenomenon arising from the interaction between an incident light wave and free electrons in the metal nanoparticles (Hu et al. 2006). As a consequence of this interaction, free electrons of the metal collectively oscillates in resonance with the frequency of the interacting lightwave (Das et al. 2010). Excitation of localized surface plasmons by light at an incident wavelength where resonance occurs results in strong light scattering, leading to appearance of surface plasmon absorption bands (Hutter and Fendler 2004). The absorption maxima and intensity of these bands are characteristic of the type of metal (e.g. gold or silver), and highly sensitive to the size, size distribution and shape of the nanostructures (Hutter and Fendler 2004). The SPR of AgNPs can be precisely correlated with the nanoparticle size and shape based on classical Mie theory (Li et al. 2013; Kreibig and Vollmer 1995), which describes the extinction spectra of spherical particles of arbitrary size (Kelly et al. 2003). The localized surface plasmon resonances that are formed on rough metallic surfaces or on metal nanoparticles lead to a strong local electromagnetic field enhancement in the vicinity of the nanoparticles (Stamplecoskie et al. 2011; Hutter and Fendler 2004). This provides an enhanced Raman signal for the species that are adsorbed onto the surface of nanoparticles/nanostructures or located around the gaps between nanoparticle arrays or aggregates called hot-spots (Petryayeva and Krull 2011). This phenomenon is called as surface enhanced Raman scattering (SERS). Electromagnetic enhancement, resulting from the optical properties of the nanostructured metallic surfaces, is thought to be the primary contributing mechanism of SERS (Sharma et al. 2012; Starowicz et al. 2018). Enhancement of SERS signals strongly depends on the shape, size and aggregation state of the nanoparticles since these parameters influence the degree of SPR (Pang, Wu, and Tian 2018; Starowicz et al. 2018; Chaudhari et al. 2019). Stamplecoskie et al. (Stamplecoskie et al. 2011) discussed that although the local electromagnetic enhancement increases with increasing particle size; the particles absorb less light and scatter more through inelastic scattering as particle size increases, causing a decrease in the overall SERS intensity. Moreover, with an increase in the AgNPs size at a fixed amount of Ag, the total surface area for adsorption decreases and is expected to offset the increased electromagnetic field of larger particles (Stamplecoskie et al. 2011). For this reason, the authors emphasized the importance of determining the optimal size of colloidal spherical AgNPs to provide a balance between electromagnetic field increase and scattering/limited surface area so as to realize maximum SERS intensity (Stamplecoskie et al. 2011). Therefore, it is crucial to be able to synthesize spherical/quasi-spherical AgNPs with controllable size and size distribution. AgNPs can be synthesized by chemical reduction in solution phase method by using a variety of reducing agents (Zhang et al. 2018). Because of different reduction potential of these reducing agents, nanoparticles can be synthesized in different size, shape and distribution. The aim of this study was to synthesize AgNPs by chemical reduction of AgNO_3 in aqueous solutions using three different reducing agents and to compare the particle shape, size and size distribution of the synthesized nanoparticles.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

In this study, AgNPs were synthesized by chemical reduction method in water using three different reducing agents: trisodium citrate (TSC) dehydrate, hydroxylamine hydrochloride (HH) and ascorbic acid (AA). Silver nitrate (AgNO_3 , cryst. extra pure, Merck) was used as a silver source. The reducing agents: trisodium citrate dehydrate ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\geq 99\%$), hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, 99%) and ascorbic acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, $\geq 99\%$) were supplied from Sigma Aldrich. Since any impurities would prevent controlled colloidal AgNPs synthesis, all the glassware was cleaned using 65% HNO_3 solution before synthesis processes, then washed with deionized water and allowed to dry. After synthesis, all the samples were stored at 4°C and in bottles covered with aluminum foil in order to maintain long-term stability by preventing agglomeration/aggregation and hindering interaction of AgNPs with light, respectively.

2.1. Synthesis of AgNPs Using Trisodium Citrate (TSC) Dehydrate as a Reducing Agent

The synthesis of AgNPs by using citrate as a reducing agent was performed by following the route proposed by Lee and Miesel (Lee and Meisel 1982). In order to synthesize colloidal AgNPs with desired shape, size and size distribution, different synthesis parameters such as concentration of reducing agent, pH and temperature can be considered. In this study, the effect of TSC concentration on colloidal AgNPs synthesis was examined using different TSC concentrations (10, 20, 34, 50 and 60 mM), while keeping the other parameters constant. Basically, 50 ml of 1.0×10^{-3} M AgNO_3 solution was heated under stirring until it begins to boil. Then, 5ml of TSC solution with a specific concentration was added dropwise to AgNO_3 solution. Heating and vigorous stirring were continued for an additional 15 min, after a color change was observed in solution. The colorless AgNO_3 solution was transformed from pale yellow to orange-yellow when TSC concentration was increased from 10m M to 60mM. The solution was then cooled naturally to room temperature. No reflux system was used in this study.

2.2. Synthesis of AgNPs Using Hydroxylamine Hydrochloride (HH) as a Reducing Agent

In this approach, the synthesis was performed according to the method proposed by Leopold and Lendl (Leopold and Lendl 2003). Briefly, 10 ml of 10^{-2} M AgNO_3 aqueous solution was rapidly added to 90 ml of 1.67×10^{-3} M HH solution containing 3.33×10^{-3} M NaOH, which was used to adjust the pH of the final colloidal solution and stirred for 20 min at room temperature. The color of the obtained colloidal silver dispersion was orange-brown and it was denoted as " AgNO_3 added to HH/NaOH".

The AgNPs synthesis approach using HH as a reducing agent was also performed by changing the order of the addition sequence of chemicals into the reaction mixture as suggested by Leopold and Lendl (Leopold and Lendl 2003) to see how the size and size distribution of AgNPs will be affected. For this purpose, 5 ml of 3×10^{-2} M NaOH aqueous solution was added into 5ml of 1.5×10^{-2} M HH aqueous solution, then the whole mixture was added dropwise into 90 ml of 1.11×10^{-3} M AgNO_3 aqueous solution while stirring. The mixed solution was stirred for further 20 min. The colloidal dispersion obtained at the end of the synthesis had a pH close to 7. The resulting dispersion showed a milky gray color, and was denoted as " HH/NaOH added to AgNO_3 ".

2.3. Synthesis of AgNPs Using Ascorbic Acid (AA) as a Reducing Agent

The synthesis of AgNPs was carried out by using AA as a reducing agent and TSC as a stabilizing agent, in this approach. The synthesis was mainly performed by following the method described by Qin *et.al* (Qin *et al.* 2010). Initially, the pH of 100 ml of an aqueous solution containing 6×10^{-4} M AA and 3×10^{-3} M TSC was adjusted to 10 by adding 0.1 M NaOH aqueous solution. Then, 1 ml of 0.1 M AgNO_3 aqueous solution was added dropwise while stirring at 30°C and the color first changed from colorless to yellow and then greenish-brown. After mixing the solution for further 15 min, the product was transferred into a water bath at 100°C and kept there for 30 min while stirring.

2.4. Characterization of Synthesized AgNPs

Formation of AgNPs was verified by X-ray diffraction (XRD) analysis (not shown) for each sample using Rigaku Miniflex 600 at a voltage and current of 40 kV and 15 mA, respectively. UV-visible absorption spectra of colloidal AgNPs were recorded by using Shimadzu UV-3600 spectrophotometer in the 300–800 nm wavelength range. Prior to UV analysis, AgNPs synthesized with TSC were directly placed into the quartz cuvette, while AgNPs synthesized with HH and AA were diluted three times with deionized water and then placed into quartz cuvettes. The morphology of the synthesized AgNPs was examined using field emission gun scanning electron microscope (FEG-SEM, Zeiss Supra 50VP) and transmission electron microscope (Hitachi HT7800 TEM). The average particle size was determined from TEM micrographs by measuring the size of at least 60 AgNPs using ImageJ software.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Synthesis of AgNPs Using Trisodium Citrate (TSC) Dehydrate as a Reducing Agent

Figure 1 shows UV-Vis spectrum of AgNPs synthesized at different TSC concentrations. The position of the absorption peak (at ~400 nm) in the UV-vis spectrum of the colloidal solution gives information about the average particle size, while the full width at half maximum (FWHM) of this band can be used to get information about particle dispersity (Qin et al. 2010). The maximum absorption peak of AgNPs synthesized by using 20, 34, 50 and 60 mM TSC was observed at 424, 432, 429 and 426 nm, respectively. These wavelengths of the absorption peaks correspond well to spherical AgNPs (Pyatenko, Yamaguchi, and Suzuki 2007; Stampelcoskie et al. 2011). The absorption intensity was significantly low in case of using 10 mM TSC, indicating that this concentration of TSC is not sufficient to form a considerable amount of AgNPs. The amount of light being absorbed by the particles is directly proportional to the concentration of these particles in the dispersion, according to Beer-Lambert Law (Ingle and Crouch 1988). The highest absorption intensity was obtained in case of using 34 mM TSC, indicating the formation of higher amount of AgNPs. However, the red-shifted peak position of this sample indicates the presence of relatively larger particles. The FWHM values of absorption peaks of all the samples are greater than 100 nm revealing a high degree of polydispersity in the synthesized nanoparticles. This is in agreement with the literature where it was reported that AgNPs synthesized by this approach have a wide variety of sizes and different shapes including rods, spheres and prisms (Meng et al. 2015; Ranzoszek-Soliwoda et al. 2017). Moreover, a small shoulder was observed at ~350 nm in the UV-vis spectra of the samples (Fig. 1). This band can be attributed to transition involving higher multipoles of AgNPs that becomes prominent for particles having symmetry lower than that of a sphere (Bhui et al. 2009).

TSC acts as both a reducing agent and a stabilizing agent in this method. Therefore, a variation in TSC concentration may cause both a change in the reduction rate and in the nucleation and growth kinetics of particles, and this complicates the determination of optimum TSC concentration. Anionic species, such as citrate ions ($C_6H_5O_7^{3-}$), are adsorbed onto AgNPs and create a negative charge on the surface of these nanoparticles. Negatively charged AgNPs then repel each other, providing an electrostatic stabilization to colloidal AgNPs against coagulation and aggregation (Lee and Jun 2019). At low TSC concentrations, such as 10 and 20 mM, coalescence of silver clusters may occur due to presence of insufficient citrate ions which prevent clusters from interacting with each other. Therefore, considering the relatively high AgNPs concentration, the optimum TSC concentration was determined as 34 mM in this study.

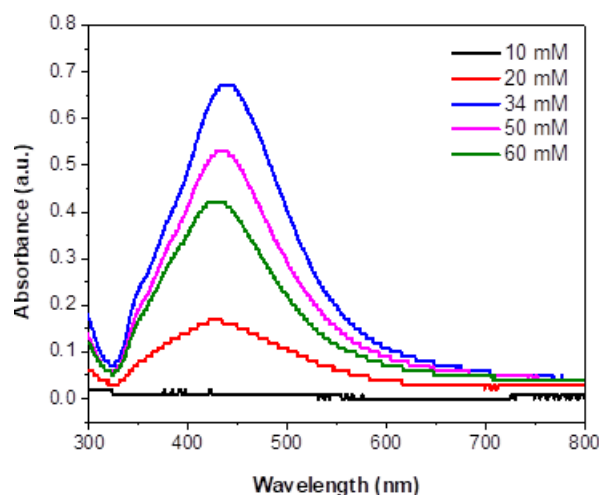


Figure 1. UV-vis absorption spectrum of AgNPs synthesized at 10, 20, 34, 50 and 60 mM TSC concentrations.

3.2. Synthesis of AgNPs Using Hydroxylamine Hydrochloride (HH) as a Reducing Agent

Synthesis of AgNPs using HH as a reducing agent is relatively easier than synthesis by citrate reduction, since the reduction process can be done at room temperature. However, to be able to achieve repeatable results, one should be very careful to perform synthesis process under the same conditions in each time.

The UV-vis absorption spectrum of AgNPs synthesized by using HH as a reducing agent is shown in Fig. 2. When AgNO_3 solution was added to HH/NaOH solution, the maximum absorption peak was observed at ~ 406 nm with a FWHM of ~ 76 nm. In case of adding HH/NaOH to AgNO_3 , this peak was red-shifted to ~ 427 nm, indicating the presence of larger particles. The FWHM of this band is ~ 119 nm, revealing a high polydispersity. These results are consistent with those reported by Leopold and Lendl (Leopold and Lendl 2003), who suggested that the dropwise addition of the reducing agent probably leads to a seeding effect resulting in a growth of the silver particles. This is also consistent with the milky gray color of the colloids that is observed when the particles are polydispersed (Leopold and Lendl 2003). However, it should be noted that SEM analyses revealed the formation of large NaCl crystals, as well as a high degree of agglomeration of AgNPs due to their relatively small size, in case of adding AgNO_3 to HH/NaOH solution (Fig. 3(a)). The presence of NaCl crystals in this sample was confirmed by XRD and EDX analyses (not shown). HH/NaOH added to AgNO_3 sample exhibited a relatively larger particle size with a much lower degree of agglomeration (Fig. 3(b)). Nano-scale gaps known as ‘hotspots’ that give rise to local electromagnetic fields as well as enhancement of Raman signal are produced between junctions of adjacent two or multiple AgNPs (Petrayeva and Krull 2011; Maher 2012). Therefore, agglomeration/aggregation of AgNPs could be advantageous for SERS analyses to some extent; however, hot-spot formation and Raman signal enhancement can be negatively affected if the amount of agglomerates/aggregates exceeds a certain amount (Vanamudan and Pamidimukkala 2015; Yaffe et al. 2010). Yaffe et al. (Yaffe et al. 2010) reported that different sized aggregates and the spacing between these aggregates change the surface plasmon resonances, causing different enhancement effects.

AgNPs synthesized using HH as a reducing agent are negatively charged due to adsorbed chloride ions onto their surface (Garrido, Weiss-Lopez, and Vallette 2016); therefore, they attract positively charged analyte molecules during SERS experiments.

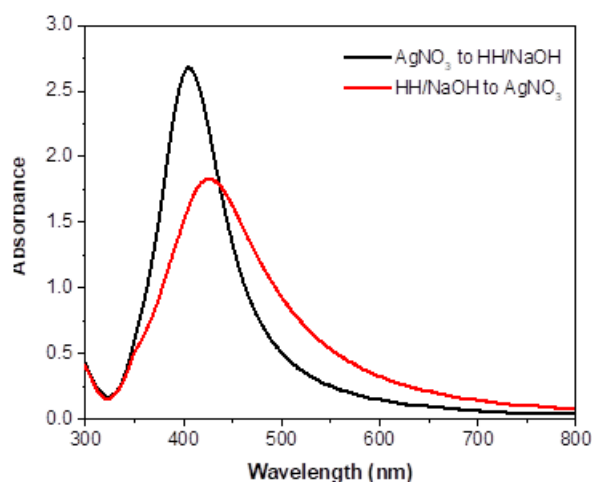


Figure 2. UV-vis absorption spectrum of AgNPs synthesized by using hydroxylamine hydrochloride (HH) as a reducing agent.

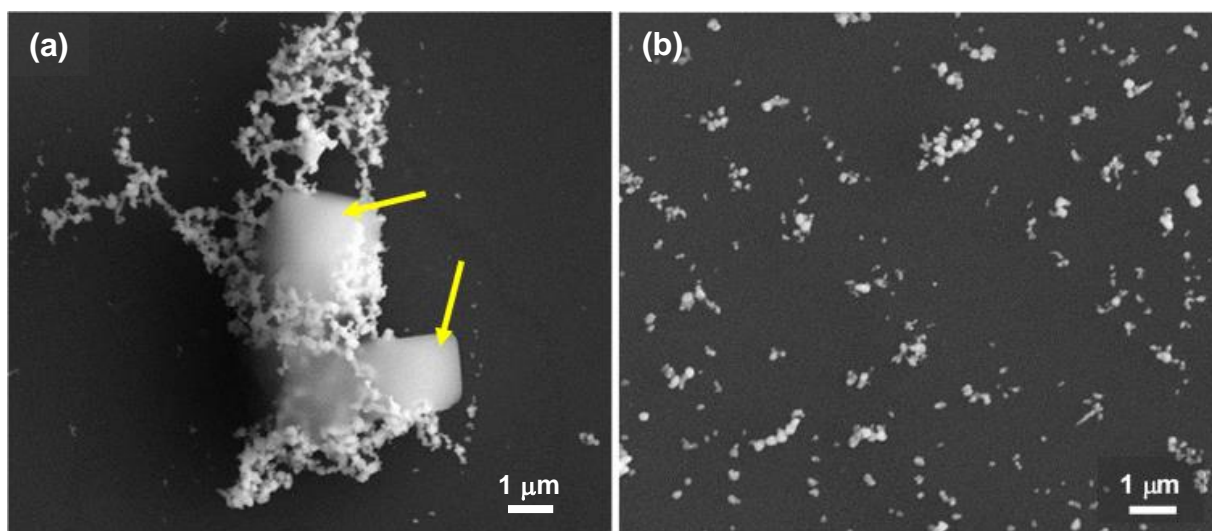


Figure 3. SEM micrographs of AgNPs synthesized by using hydroxylamine hydrochloride (HH) as a reducing agent. (a) AgNO_3 added to HH/NaOH and (b) HH/NaOH added to AgNO_3 .

3.3. Synthesis of AgNPs Using Ascorbic Acid (AA) as a Reducing Agent

In this approach, AA and TSC serve as a reducing agent and stabilizing agent, respectively. In comparison with the citrate reduction, the reaction was much faster and the color change was observed immediately, since AA is a relatively stronger reducing agent compared to TSC (Li et al. 2013).

3.4. Comparison of the AgNPs Synthesized Using Different Reducing Agents

TEM micrographs revealed mostly quasi-spherical nanoparticles for each sample (Figs. 4(a)-(f)); however, a few anisometric particles such as nanorods and triangular nanoparticles were also observed especially for the AgNPs synthesized using TSC as a reducing agent (inset at Fig. 4(b)). The average particle size was determined from TEM micrographs (Table 1) by measuring the size of at least 60 AgNPs using ImageJ software, and the corresponding statistical histograms of particle size distribution were obtained (Fig. 5). Accordingly, using AA as a reducing agent resulted in larger nanoparticles with an

average size of 78.0 ± 22.2 nm, and 35% of the total particles are >100 nm at least at one dimension. In case of using 34 mM TSC as a reducing agent, average particle size was measured as 71.6 ± 20.9 nm and $\sim 15\%$ of the total particles are >100 nm at least at one dimension. TEM images revealed that the size of all the particles are <100 nm, when HH was used as a reducing agent (Figs. 5(c) and (d)). However, as well as relatively large AgNPs with an average particle size of 60.1 ± 21.5 nm, very small nanoparticles with an average size of 8.1 ± 4.1 were observed for this sample (Fig. 5(c) – indicated by arrows and at the inset; Table 1).

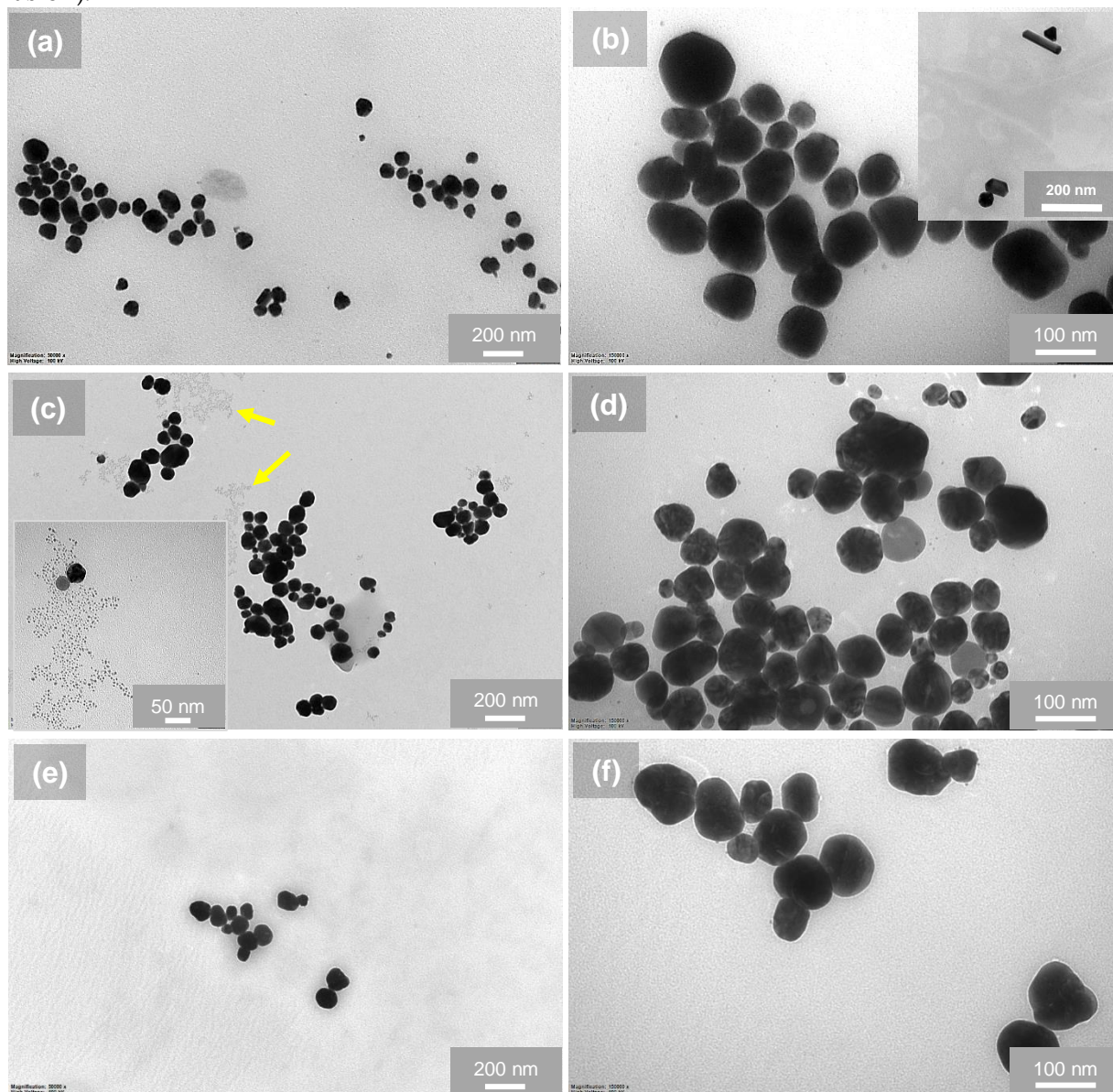


Figure 4. TEM micrographs of AgNPs synthesized using (a), (b) TSC; (c), (d) HH and (e), (f) AA as a reducing agent.

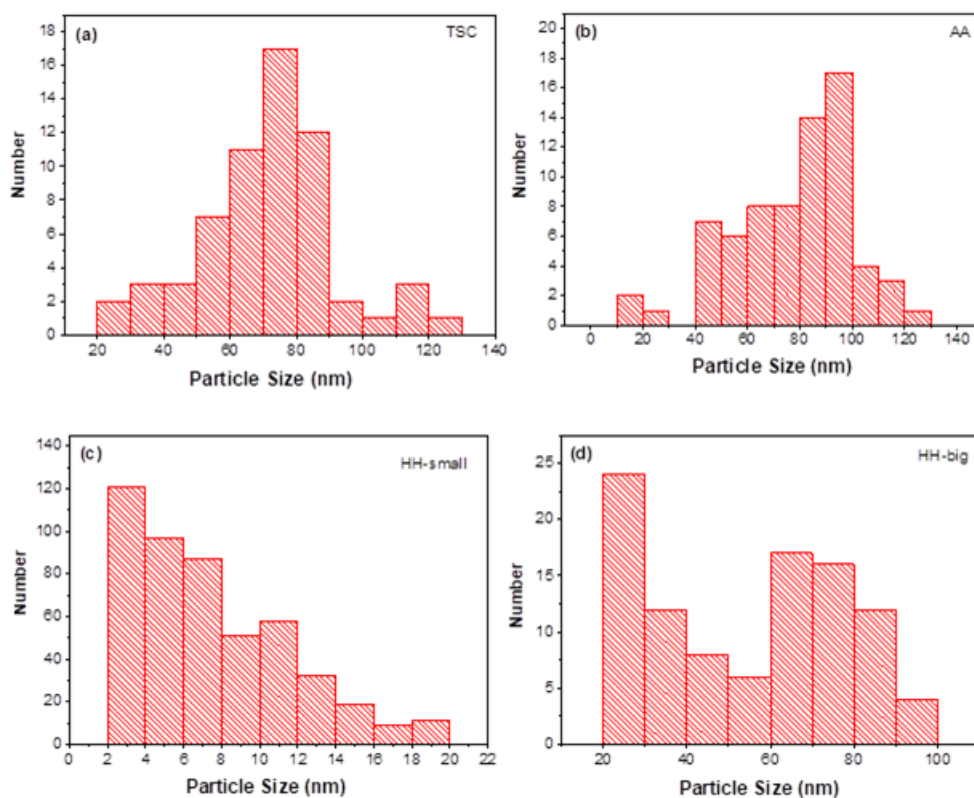


Figure 5. Statistical histograms showing size distributions of AgNPs synthesized by using (a) TSC, (b) AA and (c), (d) HH as a reducing agent.

Table 1. Comparison of AgNPs synthesized by using three different reducing agents

	Average Particle Size (nm)	Particle Shape
Trisodium citrate (34 mM)	71.6 ± 20.9	Mostly quasi-spherical; a few nanorods and triangular nanoparticles
Hydroxylamine Hydrochloride (HH/NaOH added to AgNO_3)	8.1 ± 4.1 and 60.1 ± 21.5	Bimodal size distribution, mostly quasi-spherical
Ascorbic Acid	78.0 ± 22.2	Quasi-spherical

Figure 6 shows the UV-vis absorption spectra of AgNPs synthesized by using three different reducing agents. The maximum absorption peak was observed at ~ 427 , 432 and 435 nm for the AgNPs synthesized by using HH (HH/NaOH added to AgNO_3), 34 mM TSC and AA as a reducing agent, respectively. The red-shift in the position of these plasmon peaks correspond to presence of larger particles, since there is an increasing contribution of higher-order plasmon modes for larger particles (Stamplecoskie et al. 2011). This is in agreement with the average particle size values of the AgNPs calculated from TEM micrographs (Fig. 4, Table 1). The highest absorption intensity was obtained when HH was used as a reducing agent, indicating that the highest AgNPs concentration was obtained for this sample. On the other hand, using TSC as a reducing agent resulted in a much lower absorption intensity, reflecting a relatively low concentration of AgNPs. The FWHM of the absorption peaks of AgNPs synthesized using HH, TSC and AA are 119, 130 and 114 nm, respectively. Accordingly, the highest polydispersity was obtained when

TSC was used a reducing agent, while using AA as a reducing agent resulted in a relatively lower polydispersity compared to the other samples.

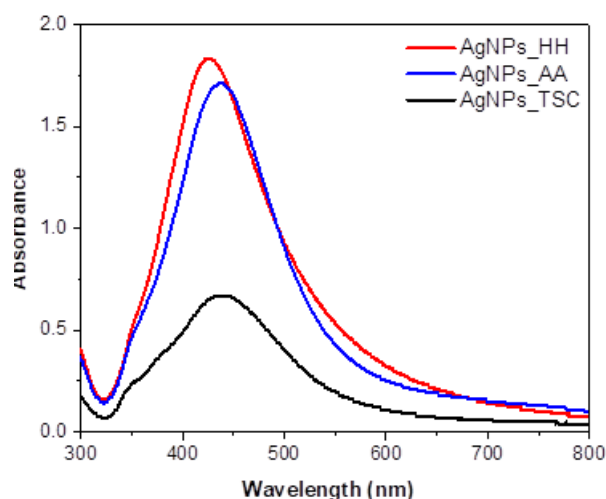


Figure 6. UV-vis absorption spectra of AgNPs synthesized by using three different reducing agents (trisodium citrate (TSC), hydroxylamine hydrochloride (HH) and asorbic acid (AA)). AgNPs_HH and AgNPs_AA samples were diluted three times.

4. CONCLUSIONS

Quasi-spherical AgNPs were synthesized by chemical reduction method using three different reducing agents: trisodium citrate (TSC), ascorbic acid (AA) and hydroxylamine hydrochloride (HH). Due to different reducing potential of these reducing agents, AgNPs with different size and size distributions were obtained. Although most of the synthesized particles were in quasi-spherical shape, some nanorods and triangular nanoparticles were also observed in case of using TSC as a reducing agent. TSC resulted in the highest polydispersity of AgNPs among the reducing agents used in this study. When HH was used as a reducing agent, the particle size and size distribution varied significantly depending on the addition sequence of chemicals into the reaction mixture. Although relatively smaller AgNPs with a narrow particle size distribution was obtained in case of adding AgNO_3 to HH/NaOH solution, a high degree of agglomeration was observed in this sample, which may negatively effect the SERS signal enhancement. Moreover, large NaCl crystals were absorbed in this sample. On the other hand, HH/NaOH added to AgNO_3 sample exhibited a relatively larger average particle size, but a much lower degree of agglomeration. TEM images revealed that the size of all the particles in this sample are <100 nm; however, a significant amount of very small AgNPs with an average size of 8.1 ± 4.1 nm were observed, as well as relatively larger ones (60.1 ± 21.5 nm in average). In case of using AA as a reducing agent, a relatively larger average particle size (78.0 ± 22.2) was obtained compared to the other samples. However, AgNPs synthesized by AA exhibited a lower polydispersity and a high absorption intensity, which indicates a compromise between size distribution and nanoparticle concentration.

5. REFERENCES

- Amendola, Vincenzo. 2016. 'Surface plasmon resonance of silver and gold nanoparticles in the proximity of graphene studied using the discrete dipole approximation method', *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18: 2230-41.
- Bhui, D. K., H. Bar, P. Sarkar, G. P. Sahoo, S. P. De, and A. Misra. 2009. 'Synthesis and UV-vis spectroscopic study of silver nanoparticles in aqueous SDS solution', *Journal of Molecular Liquids*, 145: 33-37.

- Chaudhari, Kamallesh, Tripti Ahuja, Vasanthanarayan Murugesan, Vidhya Subramanian, Mohd Azhardin Ganayee, Thomas Thundat, and Thalappil Pradeep. 2019. 'Appearance of SERS activity in single silver nanoparticles by laser-induced reshaping', *Nanoscale*, 11: 321-30.
- Das, R., S. S. Nath, D. Chakdar, G. Gope, and R. Bhattacharjee. 2010. 'Synthesis of silver nanoparticles and their optical properties', *Journal of Experimental Nanoscience*, 5: 357-62.
- Garrido, C., B. E. Weiss-Lopez, and M. M. C. Vallette. 2016. 'Surface-enhanced Raman scattering activity of negatively charged bio-analytes from a modified silver colloid', *Spectroscopy Letters*, 49: 11-18.
- Hu, M., J. Y. Chen, Z. Y. Li, L. Au, G. V. Hartland, X. D. Li, M. Marquez, and Y. N. Xia. 2006. 'Gold nanostructures: engineering their plasmonic properties for biomedical applications', *Chemical Society Reviews*, 35: 1084-94.
- Hutter, E., and J. H. Fendler. 2004. 'Exploitation of localized surface plasmon resonance', *Advanced Materials*, 16: 1685-706.
- Ingle, J.D., and S.R. Crouch. 1988. *Spectrochemical Analysis* (Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ).
- Kelly, K. L., E. Coronado, L. L. Zhao, and G. C. Schatz. 2003. 'The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment', *Journal of Physical Chemistry B*, 107: 668-77.
- Kreibig, Uwe, and Michael Vollmer. 1995. *Optical properties of metal clusters* (Springer: Berlin; New York).
- Lee, P. C., and D. Meisel. 1982. 'Adsorption and Surface-Enhanced Raman of Dyes on Silver and Gold Sols', *Journal of Physical Chemistry*, 86: 3391-95.
- Lee, S. H., and B. H. Jun. 2019. 'Silver Nanoparticles: Synthesis and Application for Nanomedicine', *International Journal of Molecular Sciences*, 20.
- Leopold, N., and B. Lendl. 2003. 'A new method for fast preparation of highly surface-enhanced Raman scattering (SERS) active silver colloids at room temperature by reduction of silver nitrate with hydroxylamine hydrochloride', *Journal of Physical Chemistry B*, 107: 5723-27.
- Li, H. S., H. B. Xia, D. Y. Wang, and X. T. Tao. 2013. 'Simple Synthesis of Monodisperse, Quasi-spherical, Citrate-Stabilized Silver Nanocrystals in Water', *Langmuir*, 29: 5074-79.
- Maher, Robert C. 2012. 'SERS Hot Spots.' in Challa S. S. R. Kumar (ed.), *Raman Spectroscopy for Nanomaterials Characterization* (Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg).
- Meng, W., F. Hu, X. H. Jiang, and L. D. Lu. 2015. 'Preparation of silver colloids with improved uniformity and stable surface-enhanced Raman scattering', *Nanoscale Research Letters*, 10: 1-8.
- Pang, Ran, De-Yin Wu, and Zhong-Qun Tian. 2018. 'Density Functional Theoretical Studies on Chemical Enhancement of Surface-Enhanced Raman Spectroscopy in Electrochemical Interfaces.' in Marek J. Wójcik, Hiroshi Nakatsuji, Bernard Kirtman and Yukihiko Ozaki (eds.), *Frontiers of Quantum Chemistry* (Springer Singapore: Singapore).
- Petryayeva, E., and U. J. Krull. 2011. 'Localized surface plasmon resonance: Nanostructures, bioassays and biosensing-A review', *Analytica Chimica Acta*, 706: 8-24.
- Pyatenko, A., M. Yamaguchi, and M. Suzuki. 2007. 'Synthesis of spherical silver nanoparticles with controllable sizes in aqueous solutions', *Journal of Physical Chemistry C*, 111: 7910-17.
- Qin, Y. Q., X. H. Ji, J. Jing, H. Liu, H. L. Wu, and W. S. Yang. 2010. 'Size control over spherical silver nanoparticles by ascorbic acid reduction', *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 372: 172-76.
- Ranoszek-Soliwoda, K., E. Tomaszewska, E. Socha, P. Krzyczmonik, A. Ignaczak, P. Orłowski, M. Krzyzowska, G. Celichowski, and J. Grobelny. 2017. 'The role of tannic acid and sodium citrate in the synthesis of silver nanoparticles', *Journal of Nanoparticle Research*, 19.
- Roy, Anupam, Onur Bulut, Sudip Some, Amit Kumar Mandal, and M. Deniz Yilmaz. 2019. 'Green synthesis of silver nanoparticles: biomolecule-nanoparticle organizations targeting antimicrobial activity', *Rsc Advances*, 9: 2673-702.
- Sharma, B., R. R. Frontiera, A. I. Henry, E. Ringe, and R. P. Van Duyne. 2012. 'SERS: Materials, applications, and the future', *Materials Today*, 15: 16-25.

- Stamplecoskie, K. G., J. C. Scaiano, V. S. Tiwari, and H. Anis. 2011. 'Optimal Size of Silver Nanoparticles for Surface-Enhanced Raman Spectroscopy', *Journal of Physical Chemistry C*, 115: 1403-09.
- Starowicz, Z., R. Wojnarowska-Nowak, P. Ozga, and E. M. Sheregii. 2018. 'The tuning of the plasmon resonance of the metal nanoparticles in terms of the SERS effect', *Colloid and Polymer Science*, 296: 1029-37.
- Vanamudan, A., and P. Pamidimukkala. 2015. 'Chitosan, nanoclay and chitosan-nanoclay composite as adsorbents for Rhodamine-6G and the resulting optical properties', *International Journal of Biological Macromolecules*, 74: 127-35.
- Xu, Gang, Yong Chen, Masato Tazawa, and Ping Jin. 2006. 'Surface Plasmon Resonance of Silver Nanoparticles on Vanadium Dioxide', *The Journal of Physical Chemistry B*, 110: 2051-56.
- Yaffe, N. R., A. Ingram, D. Graham, and E. W. Blanch. 2010. 'A multi-component optimisation of experimental parameters for maximising SERS enhancements', *Journal of Raman Spectroscopy*, 41: 618-23.
- Zhang, X. F., Z. G. Liu, W. Shen, and S. Gurunathan. 2016. 'Silver Nanoparticles: Synthesis, Characterization, Properties, Applications, and Therapeutic Approaches', *International Journal of Molecular Sciences*, 17.
- Zhang, Zhi, Wenfei Shen, Jing Xue, Yuanmeng Liu, Yanwei Liu, Peipei Yan, Jixian Liu, and Jianguo Tang. 2018. 'Recent advances in synthetic methods and applications of silver nanostructures', *Nanoscale Research Letters*, 13: 54.



TWITTER VERİLERİNDEN DOĞAL DİL İŞLEME VE MAKİNE ÖĞRENMESİ İLE HASTALIK TESPİTİ

^{1,2}Ali ÖZTÜRK , ³Üsâme DURAK , ⁴Fatma BADILLI 

^{1,3,4}KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 42020, Konya/TÜRKİYE
²Havelsan A.Ş., 06510, Ankara/TÜRKİYE

^{1,2} ali.ozturk@karatay.edu.tr, ³ usame.durak@karatay.edu.tr, ⁴ fatma.badilli@ogrenci.karatay.edu.tr

(Geliş/Received: 23.11.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.07.2020)

ÖZ: Bu çalışmada twitterdaki kullanıcıların yazmış oldukları mesajların hastalık konulu olup olmadığı ve hastalık türleri tespit edilmiştir. Bu amaçla gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi algoritmaları, TF-IDF ve BOW yöntemleri ile çıkarılan özellikler ile denenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Veriler Python betikleri ile twitter üzerinden toplanmıştır. Algoritmaları uygulamak için Python için geliştirilmiş Scikit-Learn kütüphanesi kullanılmıştır. Gözetimsiz olarak verilerin kümeleneğinde %68.60'lık bir başarı elde edilirken, gözetimli algoritmalar ile yapılan sınıflandırmalarda %97.48'lik başarı oranına ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Twitter, Hastalık Tanıma, Doğal Dil İşleme, Makine Öğrenmesi

Disease Detection From Twitter Data Using Natural Language Processing and Machine Learning

ABSTRACT: In this study, we determined whether the subject of the messages of the twitter users were about a disease and what kind of diseases they were. For this purpose, supervised and unsupervised machine learning algorithms were tested and compared using the features extracted via TF-IDF and BOW methods. Data were collected with Python scripts from Twitter. The Scikit-Learn library which was developed for Python was used to implement the algorithms. The clustering algorithms which are unsupervised methods achieved an accuracy level of %68.60, while the performance of the supervised classification algorithms reached to the accuracy level of %97.48.

Key Words: Twitter, Disease Recognition, Natural Language Processing, Machine Learning

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Twitter gibi mikro blog platformları yeni nesil bilgi kaynakları oluşturmakta ve bu bilgi kaynakları anlık olarak işlenerek dünya üzerinde herhangi bir anda ve yerde neler olduğuna dair çeşitli fikirler verebilmektedir. Bunun için de mesajların sınıflandırılması gerekmektedir. Doğal dil işleme, yapay zekanın alt alanlarından birisidir. Doğal dil ile yazılmış bir metni anlamak, bir metne cevap olarak veya farklı amaçlar için bir metin üretmek temel hedefleridir. Doğal dil işleme yöntemleri, insanların el ile yapmak zorunda olduğu bazı metin sınıflandırmalarının otomatik olarak yapılabilmesine olanak vermekte ve örneğin anket değerlendirme gibi spesifik uygulamalarda çok kullanışlı olabilmektedir.

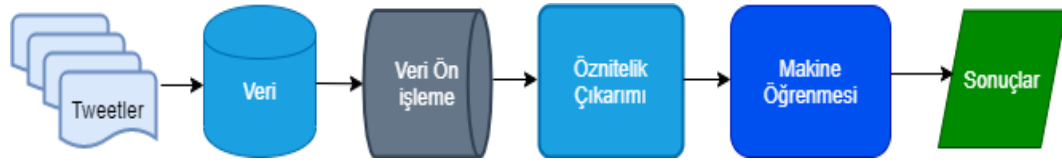
Literatürde, metinler üzerinde doğal dil işleme ile çıkarılan özelliklerin otomatik sınıflandırılmasının yapıldığı farklı çalışmalar bulunmaktadır. Ambert ve Cohen (2009), hastanelerde kullanılan serbest yazı klinik raporları üzerine doğal dil işleme yöntemleri uygulamışlardır. Bu raporlardan, hastaya ait hastalık ve tedavi durumu hakkında bir çıkarım yapabilen otomatik bir sistem

önermişlerdir. Önişleme kısmında Auto HP+ NegEx kullanarak vektörler oluşturmuşlar ve burada oluşan sıfır vektörleri için Zero-Vector Filtering (ZeroVF) kullanmışlar, ardından sınıflandırma işlemi için de Linear SVM (Support Vector Machine) algoritmasını uygulamışlardır. Sonuç olarak önerilen sistem, uzman kural tabanlı sistemlere karşı iyi bir performans göstermiştir. Achrekar ve diğ. (2011), twitter verileri üzerinde ARX (auto-regression with exogenous inputs) modelini k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemi ile uygulayarak nezle vakalarındaki artışı tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda elde ettikleri sonuçlarla, hastalık kontrol ve önleme merkezlerinden topladıkları veriler arasındaki korelasyon katsayısını 0.9846 olarak bulmuşlardır. Morita ve diğ. (2013), yapmış olduğu araştırmada grip kelimesini içeren twitter mesajlarını veri seti olarak toplamışlar, ardından bu veriler arasında gerçekten grip ile ilgili olan verileri gözetimli makine öğrenmesi algoritmaları ile test etmişler ve sonuç olarak SVM algoritmasının en iyi performansla sahip olduğunu bulmuşlardır. Özellik çıkarım adımında ise BOW algoritmasını kullanmışlar ve tweetleri belli bir doğruluk oranıyla negatif ya da pozitif olarak ayırt etmişlerdir.

Dai ve Mikdash (2015), twitter verilerinden grip hastalığı ile ilgili olanları tespit etmek için yaptıkları çalışmada öncelikle doğal dil işleme yöntemleri ile gürültülü verileri eleyerek özellik vektörü çıkarımı yapmışlardır. Daha sonra kendilerinin tanımladığı özellikler ve makine öğrenmesi algoritmalarının otomatik ürettiği özelliklere Naive Bayes yöntemini uygulayarak sınıflandırma yapmışlardır. Yine aynı araştırmacılar bir başka çalışmada (Dai ve Mikdash 2016), gürültülü twitter verilerini eleyip bunları bölgelere ayırmak için uzaklık-tabanlı aykırılık tespit yöntemini uyguladıktan sonra, grip salgınını tespit etmek için bölge-tabanlı hipotez testini kullanmışlardır. Rudra ve diğ. (2017), iki farklı salgınla (Ebola ve MERS) ilgili twitter verilerini alt düzey sözlük özelliklerine ayırarak otomatik olarak sınıflandırmışlardır. Diğer bir çalışmalarında (Rudra ve diğ., 2018) ise sınıflandırılan veriler özetlenerek, salgından etkilenen ya da etkilenmesi muhtemel topluluklarla ve sağlık kuruluşlarıyla paylaşılabilir hale getirilmiştir.

Sosyal medya uygulamaları, sağlık araştırmaları için değerli bir bilgi kaynağı olarak nitelendirilmektedir (Conway ve diğ., 2019). İnternet kullanıcıları, sosyal medya üzerinden sağlıkla ilgili konuları takip etmekte ve kendi kişisel sağlık bilgilerini paylaşmaktadır. Sosyal medya verilerinin doğal dil işleme ve makine öğrenmesi yöntemleri ile değerlendirilmesi, bilgi toplama, sağlık iletişimi, metinsel analiz, yeni çıkan bir hastalığın veya sağlık davranışlarındaki ani değişimlerin tarihsel sürecini anlama gibi alanlarda uygulamalara olanak sunmaktadır. Edo-Osagie ve diğ. (2020), yaptıkları geniş kapsamlı inceleme çalışmasında twitter verileri kullanarak yapılan sağlık bilgilerini toplama, vaka tespiti ve ilaç güvenliği gibi tıbbi uygulama alanlarını araştırmışlardır. Grip gibi enfeksiyon hastalıkları yanında akıl sağlığı gibi enfeksiyonla ilgili olmayan hastalıklarla ilgili çalışmalara da değinmişlerdir. Bu amaçla, makine öğrenmesi yöntemlerinin yanı sıra son zamanlarda derin öğrenme yöntemlerinin de kullanıldığını vurgulamışlardır. Sonuç olarak twitter verilerinin halk sağlığını ilgilendiren alanlarda etkin olarak kullanılabilmesi, fakat yarı-öğreticili (semi-supervised) yöntemlerin daha yaygın kullanımının ve araştırmaların pratiğe uygulanmasının gerekliliği üzerinde durmuşlardır. Tavoshi ve diğ., (2020) İtalya'da aşı ile ilgili paylaşılan 693 adet twitter verisini kullanarak bunları aşı taraftarı, aşya karşı ve çekimser olarak otomatik olarak sınıflandırmışlardır. Bunun için öncelikle twitter metinlerini özellik vektörlerine çevirmek için BOW(Bag of Words) tekniğini kullanmışlardır. Metindeki her ilgili kök kelimenin ağırlığını belirlemek için ise TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency) yöntemini kullanmışlardır. Kullandıkları pek çok öğreticili makine öğrenme algoritmasını 10-katlı çapraz doğrulama yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Bunlar içinde en iyi sonuç veren algoritmanın %64 doğrulukla Destek Vektör Makinaları (DVM) olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada takip ettiğimiz yöntem, twitter verilerini belirli ön işleme adımlarından geçirek özellik çıkarımı yapmakta ve bu özellikler gözetimli ve gözetimsiz makine öğrenmesi algoritmalarına uygulanarak otomatik olarak sınıflandırılmaktadır. Twitter verilerinden hastalığın varlığı, var ise türü veya hastalığın yokluğu belirlenmiştir. Takip edilen yöntemin başlıca adımları Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Takip edilen yöntemin başlıca adımları

Figure 1. Main steps of the followed method

VERİLERİN ELDE EDİLMESİ VE ÖZELLİK ÇIKARIMI (OBTAINING DATA AND FEATURE EXTRACTION)

Veriler, twitter üzerinde herkese açık şekilde paylaşımında bulunan tweetler arasından toplanmıştır. Tweetler İngilizce olup 3 ana sınıf altında "Sağlıklı", "Alerji", "Nezle" şeklinde değerlendirilmiştir. Veriler araştırmacılar tarafından okunup tweet'i atan kişinin bu 3 sınıftan hangisine uygun olduğuna karar vermesi ile etiketlenmiştir. Python dili ile araştırmacılar tarafından kodlanan bir bot kullanılarak toplam 1032 tweet mesajı toplanmıştır. Toplanan tweetlerde "Alerji" sınıfına ait verileri toplamak için içerisinde "allergy", "high fever", "hyper sensitivity" veya "allergic reaction" ifadelerini içeren tweetler seçilirken, "Nezle" sınıfına ait verileri toplamak için ise "cold", "catorrh", "common cold", "sniffles", "coryza" veya "snuffles" ifadelerini içeren tweetler seçilmiştir. "Sağlıklı" sınıfına ait veriler ise rasgele tweetlerden seçilmiştir. Kelimeler seçilirken içerisinde eşanlımlı kelimeleri bulunduran TheSaurus adlı web sitesi kullanılmıştır. Ayrıca verilerdeki rasgeleliğin artırılması açısından tweetler 10 farklı şehirden seçilmiştir. Bu şehirler şunlardır; "London", "New York", "Ankara", "İstanbul", "Tokyo", "Helsinki", "Paris", "Washington", "Moscow" ve "Stockholm". Bu mesajlar, daha sonra virgül ile ayrılmış değerler (csv) biçiminde bir dosya haline getirilmiştir. Bu verilerin 425'i "Sağlıklı", 307'si "Alerji", 300 tanesi ise "Nezle" sınıfına ait tweetlerden oluşmaktadır.

Doğal dil işlemede, ön işleme kısmı modelin anlaşılır ve güvenilir olmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada uygulanan ön işleme adımları Şekil 2'de verilmiştir. Metodoloji genel olarak anlatılmakla beraber, Şekil 2 üzerindeki işlem adımlarından URL temizlenmesi, Alfanümerik olmayan karakterlerin çıkarılması ve büyük küçük harflerin düzeltilmesi işlemleri, metinsel işlemlerde sıklıkla kullanılan Python Regex kütüphanesi aracılığıyla yapılmıştır. Kelimeler Python ile ayrılıp, köklerine ayırma (Stemming) ve etkisiz kelimelerin (Stopword) atılması adımı Python NLTK(Natural Language Tool Kit) kütüphanesi kullanılmıştır. Yanlış yazılmış olan kelimelerin düzeltilmesi için Levenshtein Distance ile Python Spellchecker modülü kullanılmış olup yanlış olduğu düşünülen kelimeler için gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Yanlış olup olmadığı kararı ise kelimenin sözlükte olup olmadığı aracılığı ile kontrol edilerek hata en alt seviyeye indirgenmeye çalışılmıştır. Yapılan işlemlerin ardından ayrılıp düzenlenen metinler, birleştirilerek ön işleme kısmı bitirilmiştir.

Öznitelik (özellik) çıkarımı bir veriyi diğer verilerden ayırt edebileceğimiz özellikleri elde ettiğimiz kısımdır. Ayrıca makine öğrenmesi algoritmaları sayılar üzerinde çalıştığı için elimizdeki metinlerin sayısal vektörler haline çevrilmesi gerekmektedir. Bunun için doğal dil işlemede farklı özellik çıkarımı algoritmaları bulunmaktadır (Manning, 1999). Bu makalede doğal dil işleme için kullanılan vektörizasyon metotlarından TF-IDF ve BOW algoritmaları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Bu algoritmaların oluşturduğu vektörlerin boyutu için 1x1000 değeri seçilmiştir.

N-Gram verilen bir metinde kelimelerin n'erli atomik yapılar olduğu kabul edilir (Cavnar,1994). N değeri 1 iken her bir kelime atomik yapıdayken, N=2 için kelimelerin 2 şerli gruplar halinde oluşturdukları kelime grupları da atomik yapılar olarak ayrıca dikkate alınır. Bu makalede BOW ve TF-IDF algoritmaları için N-Gram(1,2) seçilmiş 1'li ve 2'li kelime grupları dikkate alınmıştır.

BOW algoritması en çok geçen kelimelerden oluşan bir kelime çantası oluşturur (Zhang,2010) ve her bir tweetin içinde bu kelimelerden var olanlar için 1, olmayanlar için 0'lardan oluşan bir vektör oluşturur. Tahmin edilebileceği üzere bu vektörlerin büyük bir çoğunluğu 0'lardan oluşur ve bu matrislere seyrek matris (sparse matrix) adı da verilir. Bu çalışmada, farklı sayılar denenebileceği gibi, parametre olarak 1000 değeri seçilerek 1000 uzunluğundaki vektörler oluşturulmuştur.



Şekil 2. Metin Ön İşleme Adımları

Figure 2. Text preprocessing steps

TF-IDF yöntemi, metinleri istatistiksel olarak incelemek için kullanılan bir özellik çıkarım algoritmasıdır. Bu algoritma kullanılarak bir kullanıcının attığı tweetlerin incelenmesiyle yazılan tweetlerde hangi konulara ağırlık verildiği çıkarılabilir. TF ve IDF değerleri hesaplanırken önce TF hesaplanır. TF hesabı için metinde en fazla geçen terim sayısına ihtiyaç vardır. İstenilen terim sayısının metinde en fazla geçen terim sayısına oranı TF değerini verir (Salton,1988). IDF hesabı için ise kullanılacak olan doküman sayısına ihtiyaç vardır. Bu dokümanlar arasında istenilen terimin kaç kez geçtiğinin bilinmesi gerekmektedir. Toplam doküman sayısının terimi içeren doküman sayısına oranının logaritması alınarak hesaplanmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise terimi içeren doküman sayısıdır. Hiç bir doküman terimi içermiyorsa 0'a bölünüp belirsiz bir durum oluşabileceği için terimi içeren doküman sayısına 1 eklenmesi alternatif bir çözümdür. Son olarak, bulunan TF ve IDF değerleri çarpılarak sonuca ulaşılır (Robertson, 2004).

GÖZETİMSİZ ÖĞRENME VE K-ORTALAMA ALGORİTMASI (UNSUPERVISED LEARNING AND K-MEANS ALGORITHM)

Gözetimsiz öğrenme, verilerin değerlerinin ("Sağlıklı", "Alerji", "Nezle") algoritmaya verilmeden algoritmanın sadece verilere bakarak bir kümeleme yapmasını, daha sonra da yaptığı kümelemenin gerçekte olması gereken sınıflarla ne kadar eşleştiğini inceleyerek başarı oranını ölçen makine öğrenmesi algoritmalarının genel öğrenme biçimidir. K-Ortalama algoritması en temel gözetimsiz öğrenme algoritmalarından birisidir. K, oluşturulacak sınıf sayısını temsil etmektedir. Veriler k farklı kümeden birisine dahil edilmeye çalışılır. Algoritma en başta uzayda k noktada rasgele olarak küme merkezleri oluşturur. Ardından, her veri için bu noktalardan olan uzaklıkları hesaplanır. Uzaklıklarına göre her veri bir kümeye dahil edilir. Daha sonra yeni küme merkezleri, kümelerin ağırlık merkezine göre veya farklı yöntemlere göre seçilir ve yeni küme merkezlerine göre kümelere dağılma işlemi tekrarlanır. Bu tekrarlanmalar, kümelene kararlı bir hale gelene kadar veya belirlenen iterasyon sayısı bitene kadar devam eder. Kümelene kararlı hale gelip gelmemesi durumu da uzaklık ölçütlerinin sonuçlarına göre değerlendirilebilir. (Hartigan,1979). Ancak K-Ortalama algoritmasının bazı temel sorunları bulunmaktadır. İlk sorun kaç farklı küme olacağını belirlemek işlemidir. Araştırmada her ne kadar 3 sınıf olduğunu bilsek de, 3 sınıf olması kümelene kararlı hale gelene kadar 3 yerde olacağı anlamına gelmemektedir. Farklı kümelene kararlı bir sınıfı da belirtiyor olabilir. Mesela 6 farklı kümelene bulunabilir. 3 farklı sınıf için olası durumlardan birisi, 3 kümelene kararlı 1.sınıfı belirtmesi, 2 kümelene kararlı 2.sınıfı belirtmesi, ve son kümelene kararlı ise 3.sınıfı belirtmesi durumudur ki bu örnekte de anlaşıldığı üzere sınıf sayımız belirli olsa dahi bu küme sayısı konusunda bizim farklı tercihler yapabileceğimiz anlamını taşımaktadır. Bu durumun kararını vermek için WCSS (Within Cluster Sum of Squares) yöntemi izlenmiştir. Bu yöntemi kısaca anlatmak gerekirse uzaklıkların kareler toplamını her küme için toplayıp küme n için bir değer ortaya çıkarır. İstenilen sonuç, bu değer olabildiğince düşük bir değer olmasıdır. Fakat 0 olması için aslında n'in veri sayısı kadar çok olması gerekebilir. Bu yüzden burada dikkat edilmesi gereken nokta bizim için belirli sınıflar var ise onu kullanmamız veya n sayısındaki ufak bir değişiklik ile bize doğrulukta yüksek kazanç sağlayacak ara bir küme sayısı belirlemektir. Genel olarak böyle durumlarda, dirsek noktası denilen, türevi diğer bölgelere göre yüksek olan kısımları seçmek mantıklı olacaktır. Bu değeri hesaplamamızın altında yatan bir diğer sebep ise aynı kümeye ait bazı tweetlerin küme sayısının artırılması ile kendi aralarında kümelene olasılığının olmasıdır. Böyle bir durumda, örnek vermek gerekirse, nezle sınıfına ait olan tweetler 2 farklı yerde kümelene ise, oluşan bu durumda küme sayısı

4 olsaydı WCSS değeri ile bu problemin varlığı hakkında yorum yapılabilir ve problem çözülebilirdi. WCSS değeri 1 numaralı eşitlikte görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$WCSS(k) = \sum_{j=1}^k \sum_{x_j \in küme_j} \|x_i - \bar{x}_j\|^2 \quad (1)$$

Burada, \bar{x}_j değeri j . kümedeki örneklem ortalamasıdır.

Noktaların uzayda birbirine olan uzaklıklarının ölçülmesi için Öklid uzaklığı kullanılmıştır (Aloise, 2009). K-Ortalama algoritmasının ikinci bir zayıf noktası ise başlangıç merkezlerinin rasgele olarak seçilmesidir. Başlangıçta rasgele seçilen k merkez, eğer istenmeyen noktalara giderse, ki bu ihtimal gayet kuvvetlidir, oluşacak kümelenecekler de buna göre olacağı için bu rasgelelik olumsuz sonuçlar doğurabilir. Bu sorunu çözmek amacıyla araştırmada başlangıç değeri için farklı değerler denenmiştir. Farklı değerler ile deneme işlemi ise `random_state` parametresi olarak belirtilen bir değişken ile kontrol edilmiştir. Bu sayede rasgelelik durumu kontrol altına alınıp deterministik hale getirilmiştir. Böylece veri uzayında bir tarama işlemi gerçekleştirilerek en iyi başlangıç noktalarını veren `random_state` değişkeni aranmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken kıstas olarak ise başarı oranı tercih edilmiştir.

GÖZETİMLİ ÖĞRENME VE KULLANILAN ALGORİTMALAR (SUPERVISED LEARNING AND THE ALGORITHMS USED)

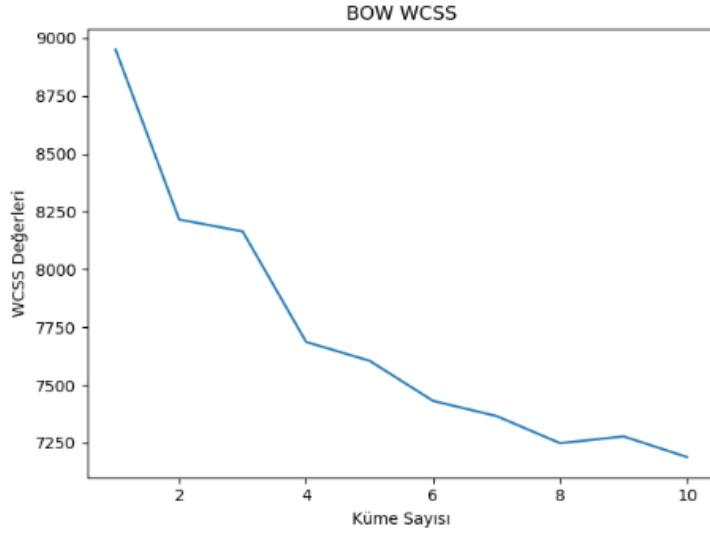
Gözetimli öğrenme, gözetimsiz öğrenmeden farklı olarak algoritmaya, veriye ait özelliklerin çıkış değerleri ("Sağlıklı", "Alerji", "Nezle") ile birlikte verilmesiyle gerçekleştirilir. Bu çalışmada, 7 farklı gözetimli öğrenme algoritması, TF-IDF ve BOW ile elde edilen özellik vektörleri üzerinde denenmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Kullanılan algoritmalar, k -En Yakın Komşu (kNN), Karar Ağacı (Decision Tree), Lojistik Regresyon (Logistik Regression), Naïve Bayes, Rasgele Orman (Random Forest), Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine), Topluluk Öğrenmesi (Ensemble Learning) algoritmalarıdır. Parametre optimizasyonu için ızgara arama (grid search) yöntemi kullanılmış (Lerman, 1980) ve belirtilen parametreler arasından en iyi olanları seçilmiştir. Güvenirliliği arttırmak ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) engellemek için de 5-katmanlı çapraz doğrulama (cross-validation) yöntemi kullanılmıştır (Srivastava, 2014). Veri 5 parçaya bölünmüş, ardından 4 parça eğitim için 1 parça ise test için kullanılmıştır. Böylece, her algoritma 5 kez çalıştırılarak her veri, hem test için hem de eğitim için kullanılarak bunlar arasında en yüksek başarı oranı, en düşük başarı oranı, standart sapma ve ortalama başarı değerleri ölçülmüştür (Kohavi, 1995).

DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

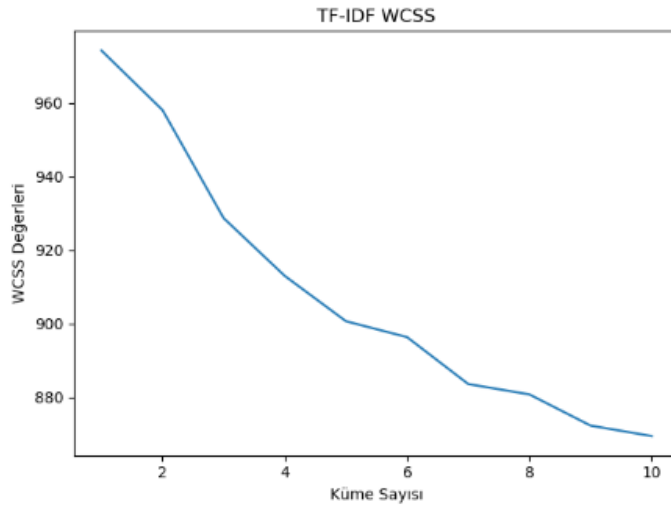
Bu bölümde araştırma boyunca yapılan deneylerin sonuçları raporlanmış ve yorumlanmıştır. Temel olarak gözetimli ve gözetimsiz algoritmalar ayrılırken, bunlar da kendi içerisinde kullandıkları öznelik çıkarımı yöntemleri olan TF-IDF ve BOW algoritmalarına göre ayrılmışlardır.

Gözetimsiz Öğrenme Sonuçları (Results of Unsupervised Learning)

BOW ve TF-IDF yöntemleri için elde edilen farklı WCSS değerleri sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü üzere BOW ve TF-IDF için hesaplanan WCSS değerlerinde, küme sayısının artması ile yüksek bir kazanç elde edilememiştir. Bu durumdan dolayı her iki yöntem için de küme sayısını değiştirmek gerekli görülmemiştir.

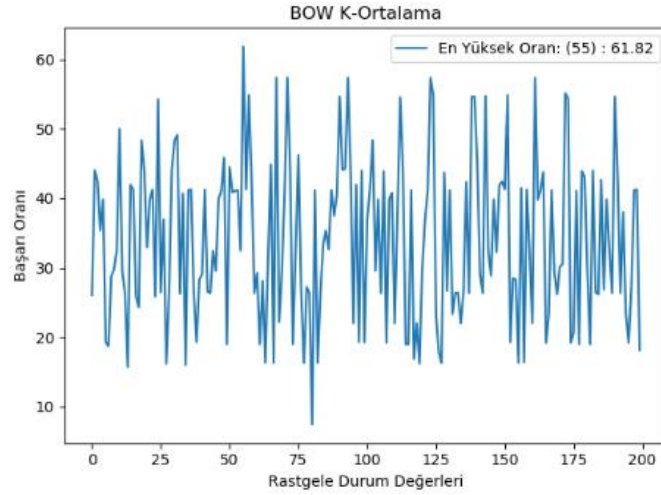


Şekil 3. BOW için WCSS değerleri
Figure 3. WCSS values for BOW



Şekil 4. TF-IDF için WCSS değerleri
Figure 4. WCSS values for TF-IDF

K-Ortalama algoritmasının başlangıç için belirlenen rasgele durum (random_state) parametresi için 0 ila 200 arasında ki tüm rasgele durum değerleri denenmiş ve sonuçlar BOW ve TF-IDF için ayrı ayrı ölçülmüştür.



Şekil 5. BOW İçin K-Ortalama rasgele durum değerleri

Figure 5. K-Means random state values for BOW

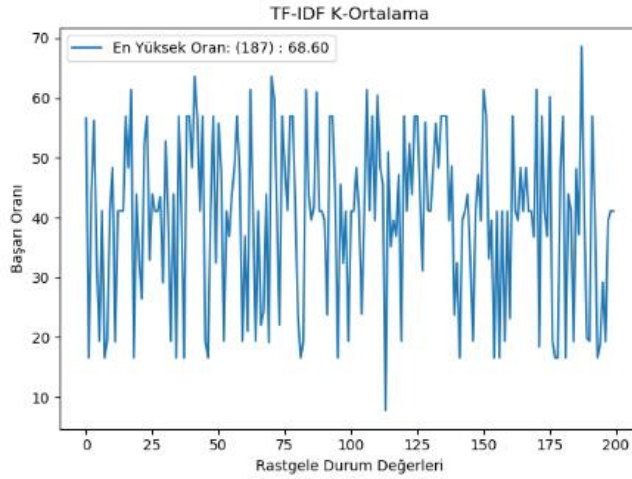
Şekil 5’de görüldüğü üzere en yüksek başarı oranı rasgele durum parametresinin 55 değeri ile 61.82 olarak ölçülmüştür. Bu durumda iken oluşan karmaşıklık matrisi Çizelge 1’de verildiği gibidir.

Çizelge 1. BOW K-Ortalama için karmaşıklık matrisi

Table 1. Confusion matrix for BOW K-Means

	Tahmin		
	Sağlıklı	Alerji	Nezle
Sağlıklı	425	0	0
Alerji	167	139	1
Nezle	226	0	74

BOW kullanımında K-Ortalama algoritması için, alerji olarak tahmin edilen tweetlerde %100 oranında doğruluk elde edilirken, nezle diye tahmin edilen tweetlerin %98.66 olarak bulunması başarılı olduğu kısımlardır. Geliştirilmesi gereken kısım hastalığın olmadığı söylenen ancak nezle veya alerji bulunan durumlardır. Algoritmanın sağlıklı olarak sınıflandırdığı tweetler için hassasiyet (precision) değeri %51.95 olduğu Çizelge 1’den, $425/(425 + 167 + 226)$ şeklinde hesaplanabilir. Şekil 6’da görüldüğü üzere en yüksek doğruluk rasgele durum parametresinin 187 değeri ile 68.60 olarak ölçülmüştür. Bu durumdayken oluşan karmaşıklık matrisi Çizelge 2’de verildiği gibidir.



Şekil 6. TF-IDF İçin K-Ortalama Rasgele Durum Değerleri

Figure 6. K-Means random state values for TF-IDF

TF-IDF için kümeleme işlemi nispeten daha başarılı sayılabilecek durumdadır. Alerji olarak tahmin edilen tweetlerde %99.27 oranında doğruluk elde edilirken, nezle diye tahmin edilen tweetlerde bu oranın %99.32 olarak bulunması algoritmanın başarılı olduğu kısımlardır. BOW'a göre daha başarılı bir sonuç veren diğer kısım ise hastalık yok diye kümelmiş olan kısımdır. Burada elde edilen başarı oranı %56.83'dür. Genel olarak bakıldığında TF-IDF ile özellik çıkarımının, algoritmanın daha başarılı çalışmasına yardım ettiği görülmektedir.

Çizelge 2. TF-IDF K-Ortalama İçin Karmaşıklık Matrisi

Table 1. Confusion matrix for TF-IDF K-Means

	Tahmin	Tahmin	Tahmin
	Sağlıklı	Alerji	Nezle
Sağlıklı	424	1	0
Alerji	170	136	1
Nezle	152	0	148

Gözetimli Öğrenme Algoritmaları İçin Sonuçlar (Results for Supervised Learning Algorithms)

Gözetimli öğrenme algoritmaları BOW ve TF-IDF metotları ile edilen özellik vektörleri ile denenmiştir. K-En Yakın Komşu (kNN) algoritması [{'n_neighbors':[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15], 'metric':['minkowski','euclidean'],'weights':['uniform','distance']}] parametreleri BOW ve TF-IDF için çalıştırılmış ve sonucunda BOW için en iyi parametreler n_neighbors=1, metric='minkowski', weights='distance' olarak bulunurken, TF-IDF için en iyi parametreler {'metric': 'minkowski', 'n_neighbors': 1, 'weights': 'uniform'} olarak bulunmuştur. Çapraz doğrulama katsayısı değeri de daha önceden söylendiği gibi 5 olarak seçilmiştir. Karar Ağacı için Criterion='Entropy', girilmiş tek parametredir. Lojistik Regresyon için herhangi bir parametre değiştirilmemiş, model Sklearn kütüphanesinin geçerli parametreleri ile oluşturulmuştur. Naive Bayes (Gaussian) için herhangi bir parametre değiştirilmemiş, model Scikit Learn kütüphanesinin geçerli parametreleri ile oluşturulmuştur. Rasgele Orman için parametreler n=7 (ağaç sayısı), max_depth=30 şeklinde belirlenmiştir. Destek Vektör Makinesi için [{'C':[1,2,3,4,5], 'kernel':['linear','poly','rbf'], 'gamma': ['scale', 1,0.5,0.1,0.01,0.001]]] denenmiş ve en iyi parametreler olarak {'C': 1, 'gamma': 1, 'kernel': 'linear'} bulunmuştur. Topluluk Öğrenmesi algoritması için Rasgele Orman, Karar Ağacı ve Lojistik Regresyon algoritmaları arasında çoğunluk oylaması yapılmıştır. Algoritmalar bahsedilmeyen tüm parametreler için varsayılan değerleri ile çalıştırılmıştır. Kullanılan algoritmalara ait parametre havuzu ve seçilen değerler Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Algoritmaların parametre seçimleri**Table 3.** Parameter selection of algorithms

Algoritmalar	Parametre Havuzu	Seçilen Değerler (Sırasıyla)
kNN + BOW	[{'n_neighbors':[1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15], 'metric':['minkowski','euclidean'],'weights':['uniform','distance']}]	1, "minkowski", "distance"
kNN + TF-IDF		1, "minkowski", "uniform"
Karar Ağacı + BOW ve TF-IDF	Criterion='Entropy',	'Entropy'
Lojistik Regresyon + BOW ve TF-IDF	Scikit-Learn varsayılan parametreleri	Varsayılan
Naive Bayes + BOW ve TF-IDF	Scikit-Learn varsayılan parametreleri	Varsayılan
Rasgele Orman + BOW ve TF-IDF	n (ağaç sayısı)=[1,2,3,4,...,15], max_depth=[1,2,3,...,30]	7, 30
DVM + BOW DVM + TF-IDF	[{'C':[1,2,3,4,5],'kernel':['linear','poly','rbf'],'gamma':['scale',1,0.5,0.1,0.01,0.001]]]	1, 1, "linear"
Topluluk Öğrenmesi + BOW ve TF-IDF	Scikit-Learn varsayılan parametreleri	Varsayılan

BOW ve TF-IDF özellik çıkarım yöntemleri için gözetimli öğrenme algoritmalarının Ortalama Doğruluk Oranı (ODO), Doğruluk Standart Sapması(DSS), En Düşük Doğruluk Oranı (EDDO), En Yüksek Doğruluk Oranı (EYDO) değerleri Çizelge 4'te verilmiştir.

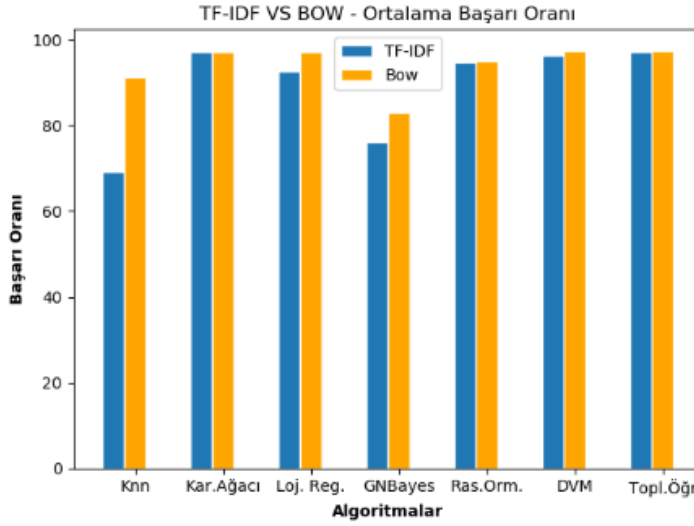
Çizelge 4. TF-IDF ve BOW ile gözetimli öğrenme algoritmalarının doğruluk oranları**Table 4.** Accuracy rates of supervised learning algorithms with TF-IDF and BOW

Algoritmalar	BOW				TF-IDF			
	ODO	DSS	EDDO	EYDO	ODO	DSS	EDDO	EYDO
kNN	%91.37	%2.25	%87.86	%94.68	%69.25	%1.22	%67.14	%70.53
Karar Ağacı	%97.19	%1.34	%95.65	%99.02	%97.19	%1.15	%95.65	%98.54
Lojistik Regresyon	%97.19	%1.19	%95.65	%99.02	%92.63	%2.28	%89.80	%96.13
Naive Bayes	%83.04	%1.93	%80.09	%85.43	%75.96	%2.67	%72.33	%79.22
Rasgele Orman	%95.06	%2.35	%92.27	%98.54	%94.67	%2.18	%92.23	%97.57
DVM	%97.48	%0.71	%96.60	%98.54	%96.31	%1.42	%94.66	%98.05
Topluluk Öğrenmesi	%97.48	%0.93	%96.60	%99.02	%97.09	%1.80	%94.20	%99.02

Gözetimli Öğrenme Algoritmalarının Karşılaştırılması (Comparison of Supervised Learning Algorithms)

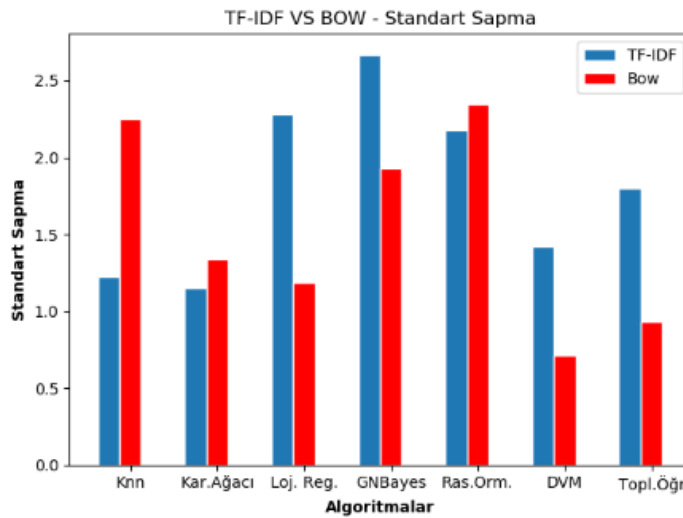
Gözetimli öğrenme algoritmalarını kendi aralarında karşılaştırmak gerekirse, bu 4 farklı ölçüme göre yapılabilir. Bunlar, en yüksek başarı oranı, en düşük başarı oranı, ortalama başarı oranı ve standart sapmadır. Ortalama başarı oranına göre gözetimli öğrenme algoritmalarının karşılaştırılması Şekil 7'de

görülmektedir. Bunların ne kadar tutarlı olduğunu ölçmek için de, Şekil 8’de standart sapmalar kullanılmıştır.



Şekil 7. TF-IDF ve BOW için algoritmaların ortalama doğrulukları
Figure 7. Mean accuracies of the algorithms for TF-IDF and BOW

Şekil 7 incelenerek başarı oranlarının BOW ile TF-IDF’ye göre genel olarak daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenebilir.



Şekil 8. TF-IDF ve BOW için algoritmaların standart sapmaları
Figure 8. Standard deviations of the algorithms for TF-IDF and BOW

Şekil 8’e bakıldığında TF-IDF veya BOW yöntemlerinin, ilgili algoritmanın standart sapması üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bu yüzden algoritmalar için her iki özellik çıkarımı da denenmiş ve başarı oranı eşit olan durumlarda standart sapmayı daha düşük olarak veren algoritma tercih edilmiştir.

Ayrıca TF-IDF ve BOW için en yüksek doğruluk oranı ve hassasiyet değerleri Çizelge 5 üzerinden incelenebilir ve algoritmaların sonuçları hakkında daha fazla bilgiye sahip olunabilir. Hassasiyet (Precision) değerinin anlamı bizim için algoritmanın tahmini ve gerçekte olan değeri arasındaki ilişkidir. Örnek vermek gerekirse Rasgele Orman algoritmasının TF-IDF ile kullanıldığı durumda başarı oranı %97.57 olarak ölçülmüştür. Ancak algoritmanın Sağlıklı dediği örnekleri incelersek, algoritmanın bunları doğru olarak sınıflandırıp Sağlıklı demiş olduğu durumlar %95.7’dir. Başka bir deyişle

algoritmanın Sağlıklı dediği ancak Alerji veya Nezle Sınıfına ait %4.3'lük bir kısım vardır. Nezle için ise bu oran %100'dür bunun anlamı model bir veri için Nezle tahmininde bulunduysa bu oran %100 olarak tutmuştur ve Nezle için verilen tüm örnekleri doğru olarak sınıflandırmıştır.

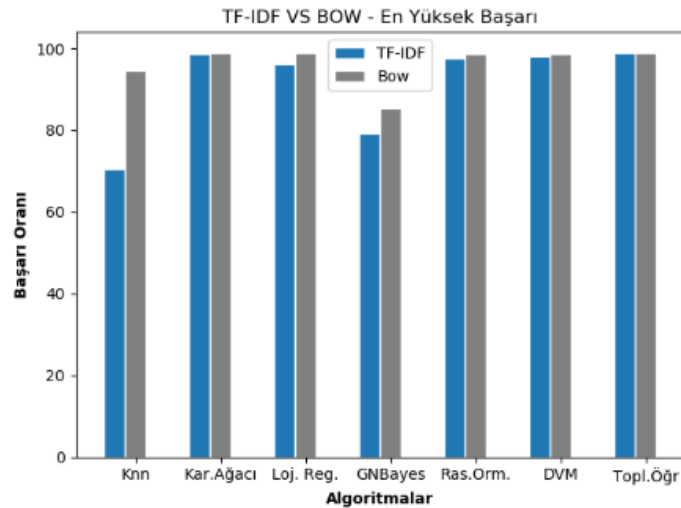
Çizelge 5. TF-IDF ve BOW İle Gözetimli Öğrenme Algoritmalarının En Yüksek Doğruluk Oranları

Table 5. Maximum accuracy rates of supervised learning algorithms with TF-IDF and BOW

Algoritmalar	Başarı	Sağlıklı	Alerji	Nezle
kNN + BOW	%94.6	%89	%100	%100
kNN + TF-IDF	%70.53	%60.6	%97.6	%82
Karar Ağacı + BOW	%99.02	%98.9	%98.3	%100
Karar Ağacı + TF-IDF	%98.54	%98.9	%96.7	%100
Lojistik Regresyon + BOW	%99.02	%97.8	%100	%100
Lojistik Regresyon + TF-IDF	%96.13	%91.2	%100	%100
Naive Bayes + BOW	%85.43	%95.9	%83.6	%77
Naive Bayes + TF-IDF	%79.22	%83.9	%76.4	%78
Rasgele Orman + BOW	%98.54	%96.7	%100	%100
Rasgele Orman + TF-IDF	%97.57	%95.7	%98.3	%100
DVM + BOW	%98.54	%98.9	%96.7	%100
DVM + TF-IDF	%98.05	%95.7	%100	%100
Topluluk Öğrenmesi + BOW	%99.02	%97.8	%100	%100
Topluluk Öğrenmesi + TF-IDF	%99.02	%97.8	%100	%100

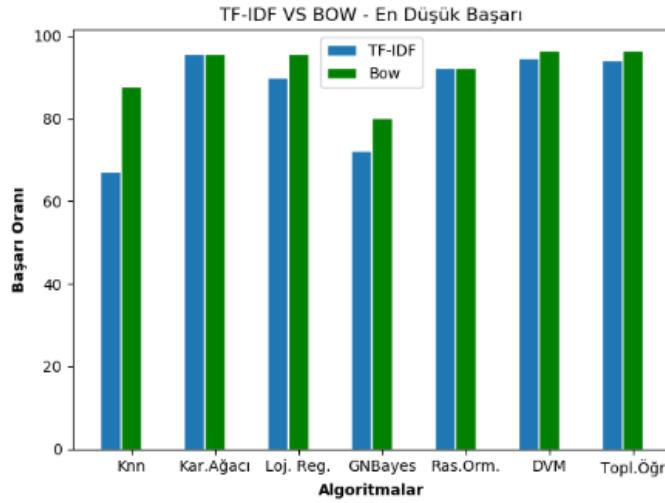
Standart sapmalar göz önünde bulundurularak tahmin edilebilse de, çapraz doğrulama ile yapılan her eğitim ve testin ardından ulaşılan en yüksek ve en düşük doğruluk durumlarını daha detaylı incelemek için Şekil 9 ve Şekil 10'a bakılabilir. Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde BOW'un TF-IDF'ye göre neredeyse tüm algoritmalarda daha iyi bir sonuca yardımcı olduğu görülmektedir. En yüksek ve en düşük değerlerinde daha iyi sonuçlar elde etmek için BOW ile özellik çıkarımı yapmanın TF-IDF'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği ortadadır. Ancak bu durum veri kümesi ile de ilgilidir. Veri kümesinin bu şekilde tweetlerden oluştuğu sistemler için BOW'un TF-IDF'ye göre daha iyi olduğunu söylemek mümkündür.

Elde edilen sonuçlara göre, ortalama başarı değeri olarak en yüksek değerler Destek Vektör Makinesi ve Topluluk Öğrenmesi Algoritmaları ile BOW kullanılarak elde edilmiş olan %97.48'lik doğruluk oranlarıdır.



Şekil 9. TF-IDF ve BOW için algoritmaların en yüksek doğruluk oranları

Figure 9. Maximum accuracy rates of the algorithms for TF-IDF and BOW



Şekil 10. TF-IDF ve BOW için algoritmaların en düşük doğruluk oranları

Figure 9. Minimum accuracy rates of the algorithms for TF-IDF and BOW

Doğruluk oranları eşit olan algoritmalar arasında güvenilirliği daha fazla olan algoritmayı seçmek gerekmektedir. Bundan dolayı Destek Vektör Makinesi ve Topluluk Öğrenmesinin BOW ile elde edilmiş sonuçları arasında standart sapmaya bakılmalı ve düşük olan seçilmelidir. Bu, daha güvenli bir modeldir. Destek Vektör Makinesine ait standart sapma değerinin %0.71, Topluluk Öğrenmesine ait standart sapma değerinin %0.93 olduğu görülmektedir. Karşılaştırmanın sonucu olarak BOW ile kullanılan DVM algoritması en başarılı olarak bulunan algoritmadır.

SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT and DISCUSSION)

Genel olarak gözetimli öğrenmenin gözetimsiz öğrenmeye göre çok daha başarılı sonuçlar gösterdiği görülmüştür. TF-IDF ve BOW için ise, gözetimsiz öğrenmede TF-IDF'nin daha iyi sonuçlar vermesine rağmen gözetimli öğrenmede her ne kadar benzer sonuçlar çıkarsalar da BOW'un biraz daha önde olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber elde edilen yüksek başarı oranları, tweetler baz alınarak bölgesel veya küresel olarak yaygın hastalıklarda artış veya azalışların gözlenebilmesi ve fark edilmesinde kullanılabileceği gibi, bu hastalıklarla başka değişkenlerin aralarında korelasyon olup olmadığını inceleyen araştırmalara da temel olabilir. Özellikle dünyanın küresel salgın ile uğraştığı bu günlerde, hastalığın ne kadar yayıldığını ölçmek için sadece testlerdeki oranlar dikkate alınmaktadır. Ancak birçok ülkede aylar geçmesine rağmen kendi nüfuslarının sadece %1-2'lik kısımlarına test yapılabilmektedir. Yapılan testlerin pozitif olan her kişi için 2 defa yapıldığı da göz önünde bulundurulursa sayıların yanıltıcı olabileceği açıktır. Normal zamanlarda bu kadar yoğun hastane başvurusuna ve test kiti kullanımına ihtiyaç duyulmayacağından, ülkelerin bu yöntemi her durumda izlemesi aşırı maliyetli ve verimsiz olacaktır. Bu durumda alternatif çözümler aranması gerektiği kaçınılmazdır. Twitter veya diğer micro blog platformlarındaki verilerin hastalıkların yayılma hızının tespiti için de kullanılabileceğinden dolayı, bu çalışmanın bu gibi alanlarda da rahatlıkla kullanılabileceğini düşünmekteyiz. Yaptığımız çalışma, farklı hastalıklar ile ilgili tweetler için de kolay biçimde adapte edilebilir olduğundan dolayı sadece 3 farklı sınıf için sınırlı değildir. İstendiği takdirde farklı hastalık durumları için eklemeler yapılabilir. Bu esneklik sayesinde birçok farklı çalışma buradaki adımları yineleyebilir ve farklı durumlar için sonuçlar gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

Aloise, D., Deshpande, A., Hansen, P., Popat, P., 2009, "NP-hardness of Euclidean sum-of-square clustering", *Machine learning*, Cilt 75, Sayı 2, ss. 245-248.

- Ambert, K. H., Cohen, A.M., 2009, "A System for Classifying Disease Comorbidity Status from Medical Discharge Summaries Using Automated Hotspot and Negated Concept Detection", *Journal of the American Medical Informatics Association*, Cilt 16, Sayı 4, ss. 590-595.
- Acherkar, H., Gandhe, A., Lazarus, R., Yu, S., Liu, B., 2011, "Predicting Flu Trends using Twitter Data", *2011 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Shanghai, China, 702-706.
- Cavnar, W. B., Trenkle, J. M., 1994, "N-gram-based text categorization.", *Proceedings of SDAIR-94, 3rd annual symposium on document analysis and information retrieval*, Las Vegas, Nevada, A.B.D., 161-175.
- Conmay, M., Hu, M., Chapman W.W., 2019, "Recent Advances in Using Natural Language Processing to Address Public Health Research Questions Using Social Media and ConsumerGenerated Data", *Yearbook of Medical Informatics*, Cilt 28, Sayı 1, ss. 208-217.
- Dai, X., Bikdash, M., 2015, "Hybrid Classification for Tweets Related to Infection with Influenza", *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2015*, Fort Lauderdale, Florida, 1-5.
- Dai, X., Bikdash, M., 2016, "Distance-based Outliers Method for Detecting Disease Outbreaks using Social Media", *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2015*, Norfolk, VA, USA, 1-8.
- Edo-Osagie, O., Iglesia, B.D.L., Lake, I., Edeghere, O., 2020, "A scoping review of the use of Twitter for public health research", *Computers in Biology and Medicine*, Available Online, 103770, doi: 10.1016/j.combiomed.2020.103770.
- Hartigan, J.A., Wong, M. A., 1979, "Algorithm AS 136: A k-means clustering algorithm", *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, Cilt 28, Sayı 1, ss. 100-108.
- Kohavi, R., 1995, "A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection", *IJCAI'95 Proceedings of The 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, Quebec, Canada, 2: 1137-1143.
- Lerman, P.M., 1980, "Fitting segmented regression models by grid search", *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, Cilt 29, Sayı 1, ss. 77-84.
- Manning, C., Schütze, H., 1999, "Foundations of Statistical Natural Language Processing", MIT press, Cambridge, MA, A.B.D.
- Morita, M., Maskawa, Aramaki, S., E., 2013, "Comparing Social Media and Search Activity as Social Sensors for the Detection of Influenza", *5th International Symposium of Languages in Biology and Medicine*, Tokyo, Japan, 75-79.
- Salton, G., Buckley, C., 1988, "Term-weighting approaches in automatic text retrieval", *Information Processing & Management*, Cilt 24, Sayı 5, ss. 513-523.
- Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R., 2014, "Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting", *The Journal of Machine Learning Research*, Cilt 15, Sayı 1, ss. 1929-1958.
- Robertson, S., 2004, "Understanding inverse document frequency: on theoretical arguments for IDF", *Journal of Documentation*, Cilt 60, Sayı 5, ss. 503-520.
- Rudra, K., Sharma, A., Gaungly, N., Imran, M., 2017, "Classifying Information from microblogs during epidemics", *Proceedings of the 2017 International Conference on Digital Health*, London, United Kingdom, 104-108.
- Rudra, K., Sharma, A., Gaungly, N., Imran, M., 2018, "Classifying and Summarizing Information from Microblogs During Epidemics", *Information Systems Frontiers*, Cilt 20, Sayı 1, ss. 933-948.
- Tavoschi L., Quattrone F., D'Andrea E., Ducange P., Vabanesi M., Marcelloni F., Lopalco P.L., 2020, "Twitter as a sentinel tool to monitor public opinion on vaccination: an opinion mining analysis from September 2016 to August 2017 in Italy", *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, Available Online, doi: 10.1080/21645515.2020.1714311.

Zhang, Y., Jin, R., Zhou, Z., 2010, "Understanding bag-of-words model: a statistical framework", *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, Cilt 1, Sayı 4, ss. 43-52.



A NOVEL APPROACH TO HEART ATTACK PREDICTION IMPROVEMENT VIA EXTREME LEARNING MACHINES CLASSIFIER INTEGRATED WITH DATA RESAMPLING STRATEGY

Ahmet SAYGILI

Tekirdağ Namık Kemal University, Computer Engineering Department, Tekirdağ, TURKEY
asaygili@nku.edu.tr

(Geliş/Received: 18.06.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 22.07.2020)

ABSTRACT: The heart attack is a disorder that is frequently seen in low-income countries and causes the death of many people. Cardiologists benefit from electrocardiography (ECG) tests to determine this condition. Supervised classification algorithms are frequently used and provide very successful results in computer-aided diagnostic systems. In this study, a new approach to predict a heart attack is proposed for classification via extreme learning machines (ELM) integrated with the resampling strategy. This study aims to reveal a new diagnostic system that will increase the success of current studies. The study has three basic steps. In order to determine the features that will ensure the system's optimized operation, firstly, the ReliefF feature selection method was applied to the data set, and then, the system was modeled by different classifiers via resampling. Besides, the as-proposed approach was applied to the breast cancer data to test the accuracy of the current system. The as-obtained results from both Statlog (heart disease) and the breast cancer data were seemed to be more successful than the studies in the literature. Thus, the as-proposed system reveals a successful and effective approach that can be applied in clinical data sets.

Keywords: Data resampling, heart attack prediction, feature selection methods, Statlog data set

VERİ YENİDEN ÖRNEKLEME STRATEJİSİ İLE BÜTÜNLEŞTİRİLMİŞ AŞIRI ÖĞRENME MAKİNELERİ SINIFLAYICILARI İLE KALP KRİZİ TAHMİNLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

ÖZ: Kalp krizi düşük gelirli ülkelerde sık görülen ve birçok insanın ölümüne neden olan bir hastalıktır. Kardiyologlar bu durumu belirlemek için elektrokardiyografi (EKG) testlerinden yararlanırlar. Denetimli sınıflandırma algoritmaları, bilgisayar destekli tanılama sistemlerinde sıklıkla kullanılır ve çok başarılı sonuçlar verir. Bu çalışmada, kalp krizini öngörmeye yeniden örnekleme stratejisiyle bütünleşmiş aşırı öğrenme makineleri (ELM) ile yapılan sınıflandırma için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmanın amacı, güncel çalışmaların başarısını artıracak yeni bir tanı sistemi ortaya koymaktır. Çalışmanın üç temel adımı vardır. İlk aşamada, ReliefF özellik seçim yöntemi veri setine uygulanır ve sistemin en iyi şekilde çalışmasını sağlayacak özellikler belirlenir. Daha sonra sistem yeniden örnekleme ile farklı sınıflandırıcılarla modellenmiştir. Ek olarak, önerilen yaklaşım meme kanseri verilerine uygulanmış ve mevcut sistemin doğruluğu test edilmiştir. Hem Statlog (kalp krizi) hem de meme kanseri verilerinin sonuçları literatürdeki çalışmalardan daha başarılı sonuçlar vermiştir. Böylece, önerilen sistem, klinik veri setlerinde uygulanabilecek başarılı ve etkili bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Veri yeniden örnekleme, kalp krizi tahmini, özellik seçim yöntemleri, Statlog veri seti

1. INTRODUCTION

Cardiovascular Disease (CVD) is the #1 cause of death worldwide. In 2016, 17.9 million people died of CVDs (Organization, 2017). Heart attacks and strokes are the main causes of 85% of these deaths. More than three-quarters of CVD deaths occur in low- and middle-income countries (Organization, 2017).

The computerized systems started to be used along with clinical methods to achieve better results in health services. Therefore, data such as patient information, medical diagnosis, and medical images were recorded (Spekowius et al., 2006). Then, the decision support systems were created by machine learning methods that process these data. In computer-aided diagnosis, such large data sets are analyzed and relevant studies are carried out to support medical professionals in their decisions. Numerous studies have been conducted, especially in the detection of both heart diseases (Buscema et al., 2013; R. Das et al., 2009; Dewan et al., 2015; Duch et al., 2001; Helmy et al., 2009; Kahramanli et al., 2008; Karabulut et al., 2012; Xiao Liu et al., 2017; Long et al., 2015; Nahar et al., 2013; Özşen et al., 2008; Polat et al., 2009; Subbulakshmi et al., 2012; Şahan et al., 2005; Takci, 2018; S.-j. Wang et al., 2009; Yilmaz et al., 2014) and breast cancer (Karabatak, 2015; Karabatak et al., 2009; Xiaoming Liu et al., 2015; Saygılı, 2018; P. Wang et al., 2016).

The Statlog data set was used in this study. There are many studies performed with the Statlog (Heart Disease) data set obtained from the UCI Machine Learning Community ("

UCI Machine Learning Repository, Statlog (Heart) Data Set"), i.e. Duch et al. used the k-Nearest Neighbor (k-NN) method integrated with the Euclid and Manhattan distances, feature space mapping, and separable split value algorithms in their study on the Statlog data set. The highest success rate obtained from this study was 85.6% (Duch et al., 2001). Şahan et al. aimed to increase the classification success by eliminating the features that have a negative impact on the data set by using the Attribute Weighted Artificial Immune System (AWAIS) method in 2005. They have achieved an accuracy rate of 82.59% in their study (Şahan et al., 2005). Özşen and Güneş used the Euclidean and Manhattan distances and hybrid similarity measures in their study to classify the Statlog data set. They achieved 83.95% success rate (Özşen et al., 2008). Kahramanlı and Allahverdi created a hybrid neural network by using both the Artificial Neural Networks (ANN) and the Fuzzy Neural Networks together, and obtained 86.8% accuracy value in their study (Kahramanli et al., 2008). Polat and Güneş proposed a method called the f-Score Feature Selection (KFFS), in their study. The highest accuracy rate on Statlog data sets they obtained, by combining the KFFS and Support Vector Machines (SVM) classifier, was 83.70% (Polat et al., 2009). In 2009, Helmy and Rasheed classified five different data sets with four different classification methods. As a result of this study, the highest success rate they achieved for a Statlog data set was determined as 85.24% by using Extreme Learning Machines (ELM) method (Helmy et al., 2009). Wang et al. reported that there was no comprehensive empirical research in SVM that is compared with an ANN or Decision Tree. For this reason, they analyzed the SVM method with four different grouping techniques, i.e. Bagging, AdaBoost, Arc-X4, and Modified AdaBoost. They used 20 real-world data sets from the UCI repository, and they achieved a success rate of 83.48% in the training samples, and 83.37% of the test samples for the Statlog data set (S.-j. Wang et al., 2009).

Subbulakshmi et al. presented an effective algorithm via ELM on the Statlog data set (Subbulakshmi et al., 2012). Buscema et al. achieved a success rate of 84.14% by using the TWIST algorithm in their study in 2013, in which ELM was used for classification purposes (Buscema et al., 2013). Karabulut and İbrikçi have established a decision support system with a 91.20% success rate to help with the coronary artery disease decisions (Karabulut et al., 2012). Yilmaz et al. used the Modified k-Means Algorithm on a cluster-based data preparation system to eliminate both the noisy and inconsistent data. The classification process was carried out by using SVM on three different data sets obtained from the UCI database. Here, the classification success rate they achieved for the Statlog data set was 97.87% (Yilmaz et al., 2014). Liu et al. tried to identify heart diseases by using hybrid classification methods. The success rate of their study was 92.59% (Xiao Liu et al., 2017). Takci has achieved 84.81% success rate in his study by using the SVM method with many feature extraction methods and classifiers. In this study, it was stated that it would be beneficial to conduct the classification by using different feature extraction methods (Takci, 2018).

In current study, mainly a three-stage algorithm, during which; (i) the best features were firstly selected via different feature extraction methods, and then (ii) the resampling strategy was used, and finally (iii) the as-obtained samples were modeled by using both ELM and other classifiers that are commonly used in the literature to develop a computer-based diagnostic system to increase the overall classification success rate of heart attack disease. It has been observed that both the feature selection and the resampling strategy contributed to the performance improvement. Also, the proposed method for the Statlog Heart Attack data set was applied in the Wisconsin Diagnostic Breast Cancer (WDBC) data set to confirm the success of the system in our study.

The second part of our study includes materials and methods, experimental studies in the third chapter, discussion, and conclusions in the fourth chapter. The fifth and last section contains the results.

2. MATERIALS AND METHODS

The machine-learning methods have been frequently used in computer-aided diagnostic systems in recent years. In our study, many and different machine learning methods were used. Here, the carried-out work consists of three steps, i.e. the feature selection, data resampling, and classification. The flow chart of these steps is shown in Figure 1. As shown in Figure 1, these steps were applied to heart attack data. The same method was also applied to the WDBC data set to evaluate the success of the proposed method. The results obtained for both data sets will be given under the title of experimental studies.

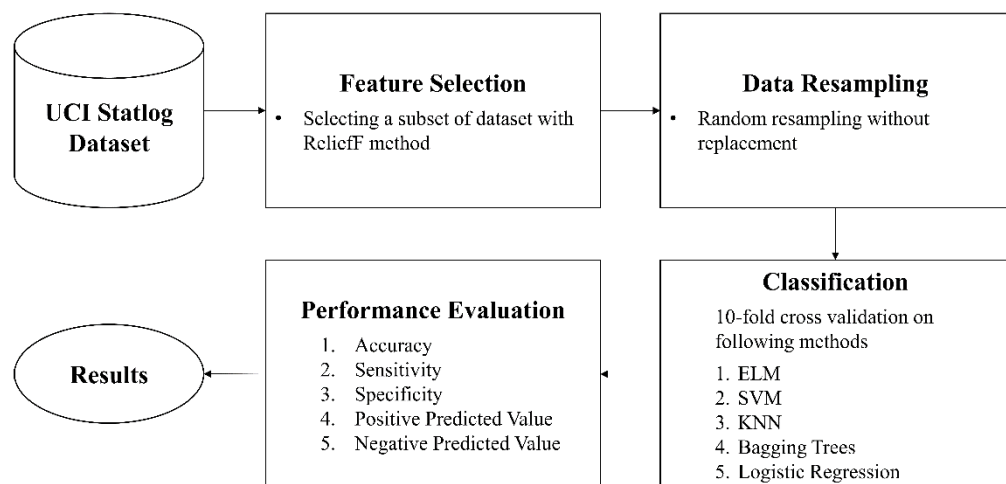


Figure 1. Flowchart for the proposed model

The ELM, SVM, k-NN, Linear Regression, Bagging Trees algorithms were used for the classification while the features were selected by a ReliefF feature selection method with random resampling without replacement strategy. The WEKA tool was used for feature selection. The success obtained by different feature selection methods in WEKA was examined and the ReliefF method was chosen because of them being the most successful method. The WEKA does not have an ELM classifier. For this reason, four other methods (SVM, k-NN, Linear Regression, Bagging Trees algorithms) were used to determine the feature selection method. The classification process was performed in the MATLAB environment. In the classification stage, five different classification methods were used as mentioned above. Four of these methods are frequently used in other studies. ELM method has been successful in many studies conducted in different fields in recent years. Based on these successful results, the ELM method was also included in the classifiers used in our study. The five different performance metrics were used for performance measurement of the classification process: accuracy, sensitivity, specificity, Positive Predicted Value (PPV), and Negative Predicted Value (NPV) shown in Figure1. The details of this three-step process that we applied in the ongoing titles will be given.

2.1. Feature Selection

Today, the amount of data used for data mining and machine learning has increased considerably in all areas. This increase led scientists to discover information from data. Such information obtained from large data sets is beneficial in many different areas. However, the increase in data has also increased the amount of noisy and complex data, as well. This large increase in data is also thought to trigger the inefficiency in both memory and time. On the other hand, it is foreseen that all the data in the data sets cannot provide meaningful information. Therefore, feature selection is required to remove unrelated input properties (Guyon et al., 2003). Feature selection not only reduces the computational complexity but also improves learning accuracy and intelligibility of outputs (Freeman et al., 2015). Achieving successful results is closely related to the selection of both right features and the use of right methods. There is a large amount of data, especially in the field of medicine. In this process, machine-learning methods are frequently used in recent years.

Feature selection methods can be classified as the wrapper-based and the filter-based methods (S. Das, 2001). The wrapper-based methods measure the usefulness of classifier-based features. In contrast, the filter-based methods select features that are measured by univariate statistics rather than the cross-validation performance, i.e. the appropriateness of features. Therefore, the wrapper-based methods mainly solve the real problem, but they are also more expensive compared to the filter-based methods, in terms of calculation.

The ReliefF method used in this study is one of the most widely used and effective algorithms among the filter-based feature selection methods. This method provides a very simple, but effective procedure for estimating the quality of properties in problems with dependencies between features (Robnik-Šikonja et al., 2003). ReliefF selects a random instance x_j , then searches for two nearest neighbors: one from the same class, called nearest hit H , and the other from the other class, called nearest miss M . Weights ($W[k]$) for each feature (k) are updated depending on their values for x_j , M and H ; and then, the weight assigned to every feature is a (each training instance) real value in the range $[-1; 1]$. The pseudocode of this method is as shown in Figure 2.

ReliefF Algorithm

Input: for each training instance a vector of attribute values and the class value

Output: the vector W of estimations of the qualities of attributes

set all weights $W[k]=0.0$;

for $j=1$ to n do begin

select an instance randomly x_j

find nearest hit H and nearest miss M

for $k=1$ to a do

$W[k]= W[k]- \text{diff}(k, x_j, H)/n+\text{diff}(k, x_j, M)/n$

End

Figure 2. The pseudocode for the ReliefF algorithm (Chen et al., 2009)

Here, the $\text{diff}(k, I_1, I_2)$ function calculates the difference between the k attribute values of the I_1 and I_2 samples. For numerical attributes, it is defined as:

$$\text{diff}(A, I_1, I_2) = \frac{|\text{value}(A, I_1) - \text{value}(A, I_2)|}{\max(A) - \min(A)}$$

This function is also used in the distance between the samples to find the nearest neighbors. In this process, it can be assumed that the total distance is the sum of the distances above all features (Manhattan distance). The idea behind the Relief algorithm process can be intuitively explained as follows. On the one hand, different values of the k property between x_j and M mean that this k features tends to separate two instances with different class labels; in this case, the feature has a desired discriminatory effect, thereby increasing the quality estimate $W[k]$. On the other hand, if k shows different values for x_j and H ,

$W[k]$ will decrease because the k attribute tends to lead to separate samples from the same class. The entire process is repeated n times, where n can be defined by the user. At the end of the iterative process, the W vector will take on a structure that represents the ability of the features to separate instances of different classes and keep instances of the same class close together (Chen et al., 2009).

2.2. Data Resampling

Resampling is a set of methods used to reconfigure sample data sets, including both the training sets and the validation sets. It can provide different sets of samples that are more useful for the learning process. The real-world data sets can have a non-uniform class distribution, as in the Statlog data set, which can significantly affect a classifier's performance during the training phase.

In random resampling, there are two approaches, namely with/out replacement, to random selection. The difference between these two approaches is about the sampling strategy's replacement when a sample can be selected more than once (Mitra et al., 1984). In random resampling without replacement, each sample in the data set has the chance to be selected equally, i.e. the selected sample cannot be reselected. However, in random resampling with replacement, it is possible to repeatedly select each sample with an equal chance of selection.

2.3. Classification

In this study, the ELM method was used in the classification stage and its success was compared with SVM, k-NN, linear regression, bagging trees algorithms. The relevant results will be given under the title of experimental studies. At this stage, the ELM method, which is frequently preferred in recent years, will be briefly explained.

A feed-forward neural network is an artificial neural network (ANN), in which, the process moves only in the forward direction from the input nodes to the output nodes. The single-layer feed-forward neural network (SLFNs) is one of the simplest kinds of neural networks, which consists of a single layer of output nodes (the inputs are fed directly to the outputs via series of weights). As for the ELM, which is also an SLFNs model, the input weights are randomly determined, while the output weights are determined analytically(G.-B. Huang et al., 2004, 2006). The method's process steps are shown in Figure 3.

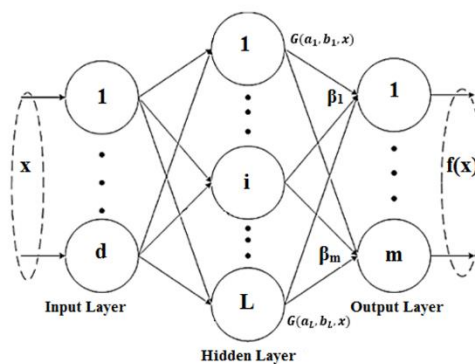


Figure 3. The ELM Network Scheme

The output function of ELM is

$$f_L(x) = \sum_{i=1}^L \beta_i h_i(x) = h(x)\beta \tag{1}$$

where $\beta = [\beta_1, \dots, \beta_L]^T$ is the vector of the output weights between the hidden layer of L nodes and the output node, and $h(x)$ is the output vector of the hidden layer $h(x) = [G(a_1, b_1, x), \dots, G(a_L, b_L, x)]$ where $G(a,b,x)$ is a nonlinear piecewise continuous function. In this study, the sigmoid activation function was selected due to its widespread use in the literature.

$$\text{Sigmoid Function: } G(a, b, x) = \frac{1}{1 + \exp(-(a \cdot x + b))} \tag{2}$$

where x is an input sample, a is the weight, and b is the bias value from the input layers to the hidden layers. $\{a, b\}$ pair is randomly generated. The ELM minimizes the training error as well as the output weights' norms (G.-B. Huang et al., 2004, 2006). Minimize: $\|H\beta - T\|^2$ and $\|\beta\|$ where H is the hidden-layer output matrix;

$$H = \begin{bmatrix} h_1(x_1) & \cdots & h_L(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1(x_N) & \cdots & h_L(x_N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Here, instead of the standard optimization method, the minimal norm least square method was used in the original implementation of the ELM (G. B. Huang et al., 2012).

$$\beta = H^\dagger T, \quad (4)$$

where T is the label matrix, and H^\dagger is the Moore-Penrose generalized inverse of the hidden layer output matrix $H = [h^T(x_1), \dots, h^T(x_N)]^T$ for N training samples. One of the methods to calculate Moore-Penrose generalized inverse of a matrix is the orthogonal projection method: $H^\dagger = (H^T H)^{-1} H^T$. One can add a regularization value C to the diagonal of $H^T H$. The solution tends to have better generalization performance as follows (G. B. Huang et al., 2012);

$$f_L(x) = h(x) \left(\frac{1}{C} + H^T H \right)^{-1} H^T T \quad (5)$$

3. EXPERIMENTAL STUDIES

UCI Statlog (Heart disease) data were used in our study. The data set consists of 270 different samples, 13 different features, and 1 class label is shown in Table 1. 13 different features in the data are selected from 76 different features.

Table 1. Statlog (Heart Disease) data set

Feature	Description	Data Type	Mean	Standard Deviation
Age	Age in years (29-77)	Real	54	9
Sex	0 = female; 1 = male	Binary	-	-
Chest pain type	1 = typical angina; 2 = atypical angina; 3 = non-angina pain; 4 = asymptomatic)	Nominal	-	-
Resting blood pressure	(in mm Hg on admission to the hospital) 94-200	Real	131.34	17.86
Serum cholesterol in mg/dL	126-564	Real	249.66	51.69
Fasting blood sugar > 120 mg/dL	0=false, 1=true	Binary	-	-
Resting electrocardiographic results	0 = normal; 1 = having ST-T; 2 = hypertrophy	Nominal	-	-
Maximum heart rate achieved	71-202	Real	149.68	23.17
Exercise-induced angina	0=no, 1=yes	Binary	-	-
Old peak	ST depression induced by exercise relative to the rest 0-6.2	Real	1.05	1.145
The slope of the peak exercise ST segment	1 = up sloping; 2 = flat; 3 = down sloping)	Ordered	-	-
Number of major vessels (0-3) colored by fluoroscopy	0, 1, 2, 3	Real	-	-
Thal	3 = normal; 6 = fixed defect; 7 = reversible defect	Nominal	-	-
Num (the predicted attribute)	Diagnosis of heart disease (angiographic disease status) 1 = < 50% diameter narrowing; 2 = > 50% diameter narrowing	Nominal	-	-

Our study consists of three stages: feature selection, data resampling, and classification. The ReliefF method is used in feature selection. The WEKA tool was used for feature selection. The WEKA does not have an ELM classifier. For this reason, four other methods (SVM, k-NN, linear regression, bagging trees algorithms) were used to determine the feature selection method. The classification achievements obtained by different feature selection methods in WEKA were examined and the ReliefF method was chosen as the most successful method. Following the application of ReliefF feature selection method, features "Age", "Sex", "Chest pain type", "Resting blood pressure", "Old peak", "The slope of the peak exercise ST-segment", "Number of major vessels (0-3) colored by fluoroscopy", "Thal" were selected.

The other data set used in this study is the Wisconsin Diagnostic Breast Cancer data set consisting of 569 samples and 32 features in the UCI Machine Learning store. Some of the features included in the data set are; radius, texture, perimeter, smoothness, concavity, concave points, etc. 212 were malignant (Malignant) and 357 were benign (Benign) of the 569 breast cancer data in the data set. One of the features is a class tag and one is an ID variable. First, the ID feature within 32 features has been manually removed. Because ID is just a sequence number used to show examples. Then, The ReliefF method was also applied to the breast cancer data set. Following the application of ReliefF feature selection method to the breast cancer data, features, "symmetry worst", "concave points se", "smoothness mean", "texture se", "fractal dimension worst", "compactness se", "symmetry mean", "fractal dimension se", "concavity se" were removed. Thus, 22 features were selected by the ReliefF feature selection method. After the feature selection, the resampling method described in the previous section is applied to the data set. In our study, random resampling without replacement method was preferred. This method is chosen because each sample has an equal number of chances.

The classification process was performed in the MATLAB program. In the classification stage, five different classification methods are used. Four of these five different methods are frequently used in many studies. However, the ELM method has gained popularity in recent years. ELM method has been successful in many studies conducted in different fields. Based on these successful results, the ELM method was also included in the classifiers used in our study. As expected, the most successful results were obtained by the ELM method. Therefore, it is thought that it will be beneficial to provide technical details of this method. With this in mind, in Chapter 2, instead of giving technical details of all classifiers, only the technical details of the ELM method are given. Instead of the technical details of other classical classifiers, only the parameters used for that method are given (Table 2).

As shown in Figure 1, five different performance metrics were used for performance measurement of the classification process: accuracy, sensitivity, specificity, Positive Predicted Value (PPV) and Negative Predicted Value (NPV). The formulas of these metrics are shown below. In the formulas, TP shows True positive, TN true negative, FP false positive, and FN false negative.

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{(TP+TN+FP+FN)} \quad (6)$$

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (7)$$

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{(TN+FP)} \quad (8)$$

$$\text{PPV} = \frac{TP}{(TP+FP)} \quad (9)$$

$$\text{NPV} = \frac{TN}{(TN+FN)} \quad (10)$$

The parameters of the methods used in the classification stage are shown in Table 2. The parameters of the classification methods were determined experimentally. For example, for the ELM method, the number of hidden layers is tested with 256, 512, 1024, 2048, and 4096 values and the most suitable hidden layer number is determined to be 1024. Similarly, in the k-NN method, the number of k is tested with 1, 3, 5, 7, 9 values and the distance metric is tested with Euclidean and Manhattan. The most suitable distance metric was found to be Euclidean while the most suitable k number was 1.

Table 2. Parameters of the classification methods

ELM	Activation Function: Hidden Nodes:	Sigmoid 1024
SVM	Kernel Function: Kernel Scale:	Gaussian 0.61
k-NN	Number of Neighbors: Distance Metric:	1 Euclidean
Bagging Trees	Ensemble Method: Learner Type: Number of Learners:	Bag Decision Tree 30
Logistic Regression	Default parameters	

Firstly, the classification process was carried out on the raw data set. Table 3 shows the results obtained after applying the classification process to the raw data set without feature selection and resampling operation. The highest accuracy rate obtained after grading the raw data set was 85.2% with the SVM method. When Table 3 is examined, it is seen that sensitivity values are higher than other metrics. For example, the highest accuracy rate was obtained as 85.2% with the SVM method and the sensitivity value of the same method was 90%. Sensitivity means "the percentage of sick people who are correctly identified". Therefore, it can be said that the model proposed in our study comes to the fore in labeling the patients as patients.

Table 3. Success rates of the raw Statlog data set

Model	Accuracy	Sensitivity	Specificity	PPV	NPV
ELM	76.29	81,33	70,00	77.22	75.00
SVM	85.2	90.00	79.17	84.38	86.36
k-NN	84.4	91.33	75.83	82.53	87.50
Bagging Trees	82.2	88.00	75.00	81.48	83.33
Logistic Regression	83.7	87.33	79.17	83.97	83.33

After obtaining the results with the raw data set, the feature selection was made by the ReliefF method. Then the classification process was performed. Table 4 shows the results obtained after this process. It is observed that the feature selection which is seen in Table 4 increases the success of the system. The highest classification rate was 87.41% by the ELM method.

Table 4. Success rates after feature selection

Model	Accuracy	Sensitivity	Specificity	PPV	NPV
ELM	87.41	85.33	90.00	91.43	83.08
SVM	85.9	91.33	79.17	84.57	87.96
k-NN	84.4	93.33	73.33	81.40	89.80
Bagging Trees	82.2	86.00	77.50	82.69	81.58
Logistic Regression	84.8	88.67	80.00	84.71	84.96

In the last experiment, firstly, feature selection, then resampling process was applied to the data set. As can be seen from Table 5, resample operation significantly increased classification success. In the

previous experiment, the highest success was 87% and now it was 98.89%. Table 5 shows the results obtained according to different metrics.

Table 5. Success rates after feature selection and resampling

Model	Accuracy	Sensitivity	Specificity	PPV	NPV
ELM	98.89	100	97.27	98.16	100
SVM	89.3	87.33	91.67	81.76	85.27
k-NN	91.9	96.00	86.67	96.00	94.55
Bagging Trees	91.1	91.33	90.83	95.14	89.34
Logistic Regression	81.9	86.67	75.83	81.76	81.98

When Table 5 is examined, we see that the sensitivity value is 100% for the ELM method, which gives the highest accuracy. This means that all patients with heart disease are correctly diagnosed. The specificity value of the ELM method is 97.27%. It is seen that the specificity value which shows the correct diagnosis rate in patients without heart disease is relatively lower than the sensitivity value. It can be said from this that the rate of accurate diagnosis of those with heart disease is higher than the rate of accurate diagnosis of those without heart disease.

To understand the success of the model we applied, we also trained the breast cancer data set with the same model. And the results are given in Table 6 which shows the accuracy rates of data sets with normal distribution and resampled distribution. Resampling seems to increase success in both breast cancer and the Statlog data set.

Table 6. Success rates for breast cancer and Statlog data set

Data set	Normal Distribution		Resampled Distribution	
	Accuracy	Training Time	Accuracy	Training Time
Statlog	87.41	2.46	98.89	2.26
Breast Cancer	96.7	2.176	99.00	2.128

4. RESULT AND DISCUSSIONS

Several studies have been performed using the Statlog data set. The first of these studies was used in the same data set was published in 2001. The success of this study by Duch et al. was 85.6% (Duch et al., 2001). Many more studies were conducted in the following years. These studies are shown in Table 7. When the studies in the literature are examined, it is possible to see that the usual classification methods such as SVM and k-NN are used and successful results are obtained.

Table 7. Studies using the Statlog data set in the literature

Author	Method	Success Rate (Accuracy %)
(Duch et al., 2001)	k-NN	85.60
(Şahan et al., 2005)	AWAIS	82.59
(Özşen et al., 2008)	GA-AWAIS	87.43
(Kahramanli et al., 2008)	Hybrid Neural Network	86.80
(Polat et al., 2009)	RBF kernel F-score + LS-SVM	83.70
(Helmy et al., 2009)	Algebraic Sigmoid	85.24
(S.-j. Wang et al., 2009)	SVM	83.37
(Subbulakshmi et al., 2012)	ELM	87.50
(Buscema et al., 2013)	TWIST	84.14
(Karabulut et al., 2012)	Rotation Forest Levenberg-Marquardt Backpropagation	91.20
(Yilmaz et al., 2014)	Modified K-Means+SVM	97.87
(Xiao Liu et al., 2017)	ReliefF and Rough Set (RFRS)	92.59
(Takci, 2018)	SVM	84.81
This Study	ReliefF+Resampling+ELM	98.89

As can be seen from Table 7, the most successful result before our study belongs to the study carried out by Yilmaz et al. (Yilmaz et al., 2014). With our model, this success has been slightly improved and has been 98.89%. Determining the most successful one among the different feature selections and resampling the data on it has led to an increase in success.

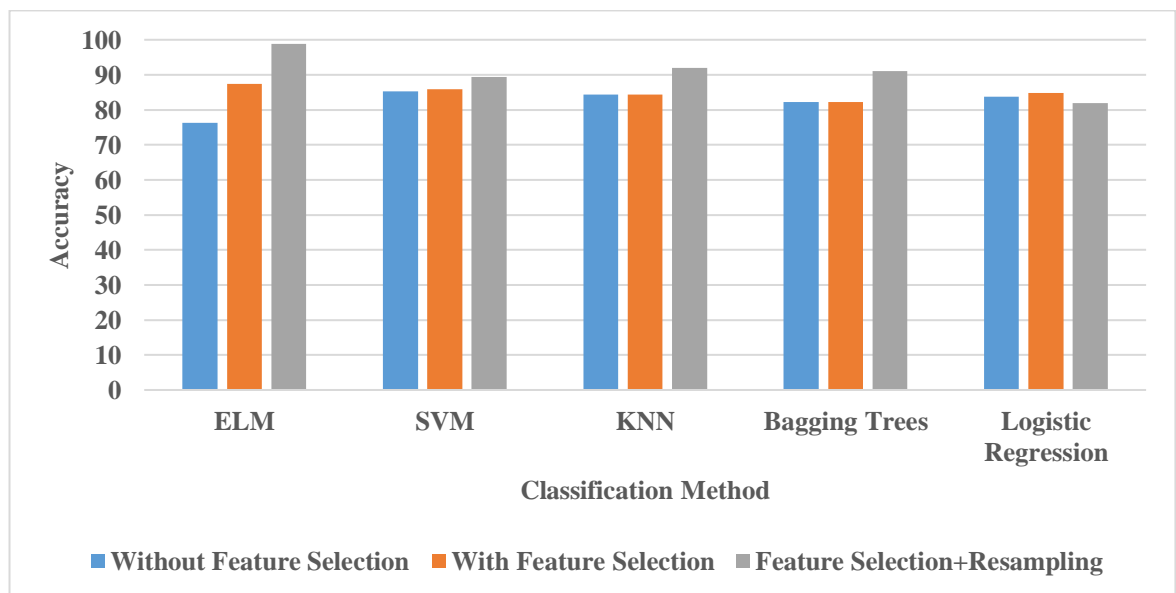


Figure 4. The success rates, according to the feature selection and resampling operations

In order to see the effect of both feature selection and the resampling methods on the success, a column graph seen in Figure 4 was formed. As can be seen from the graph, the feature selection and the resampling increased the success in almost all methods. Only logistic regression procedures did not contribute positively to the results. It can be seen that especially the operations in ELM, k-NN, and Bagging Tree methods increased the success.

5. CONCLUSIONS

The medical industry includes a large unprocessed data set. The processing of this data and the discovery of information from the data allow for early diagnosis and treatment of many diseases. Machine learning techniques can be used in the diagnostic systems in the analysis of raw data. A heart attack is one of the main causes of death. Therefore, early diagnosis of these diseases is of vital importance.

In this study, various machine learning methods were applied to predict a heart attack. The achievements of these methods were applied to the Statlog heart attack data set. It was also applied to the Breast cancer data set and it was questioned whether the system was successful or not. The results obtained were compared with the other studies in the literature and it was shown that the current applied system yielded more successful results. In particular, the success of resampling in data sets with an unbalanced distribution has been demonstrated in this study. The success of ELM in resampled data is also shown in Tables 5 and 6. As in other studies in this field, two of the most successful methods have been k-NN and bagging methods. In the data sets with regular distribution, the increase in the success of both methods is noteworthy. The biggest deficiency of our study is that the data sets used are not large enough. In future studies, we aim to test the existing methods by creating larger data sets.

We have various predictions to carry our work to a more advanced level. In particular, the system used in this study can be implemented in large-scale real-world data sets and the scope can be extended. A variety of procedures can be applied to the application of different techniques in the prediction of a heart attack. Also, it is predicted that the success of the system can be increased by using different methods or hybrid methods.



6. REFERENCES

- Buscema, M., Breda, M., & Lodwick, W., 2013, Training With Input Selection and Testing (TWIST) algorithm: a significant advance in pattern recognition performance of machine learning, *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, 5(1), 29.
- Chen, J. Y., & Lonardi, S. 2009, *Biological data mining*: CRC Press.
- Das, R., Turkoglu, I., & Sengur, A., 2009, Effective diagnosis of heart disease through neural networks ensembles, *Expert Systems with Applications*, 36(4), 7675-7680.
- Das, S., 2001, *Filters, wrappers and a boosting-based hybrid for feature selection*, Paper presented at the Icml.
- Dewan, A., & Sharma, M., 2015, *Prediction of heart disease using a hybrid technique in data mining classification*, Paper presented at the Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2015 2nd International Conference on.
- Duch, W., Adamczak, R., & Grabczewski, K., 2001, A new methodology of extraction, optimization and application of crisp and fuzzy logical rules, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 12(2), 277-306.
- Freeman, C., Kulić, D., & Basir, O., 2015, An evaluation of classifier-specific filter measure performance for feature selection, *Pattern Recognition*, 48(5), 1812-1826.
- Guyon, I., & Elisseeff, A., 2003, An introduction to variable and feature selection, *Journal of machine learning research*, 3(Mar), 1157-1182.
- Helmy, T., & Rasheed, Z., 2009, *Multi-category bioinformatics dataset classification using extreme learning machine*, Paper presented at the Evolutionary Computation, 2009. CEC'09. IEEE Congress on.
- Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., & Siew, C.-K., 2004, Extreme learning machine: a new learning scheme of feedforward neural networks, *Neural Networks*, 2004., 2, 985-990.
- Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., & Siew, C.-K., 2006, Extreme learning machine: theory and applications, *Neurocomputing*, 70(1-3), 489-501.
- Huang, G. B., Zhou, H., Ding, X., & Zhang, R., 2012, Extreme Learning Machine for Regression and Multiclass Classification, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(2), 513-529. doi:10.1109/TSMCB.2011.2168604
- Kahramanli, H., & Allahverdi, N., 2008, Design of a hybrid system for the diabetes and heart diseases, *Expert Systems with Applications*, 35(1), 82-89. doi:https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.06.004

- Karabatak, M., 2015, A new classifier for breast cancer detection based on Naïve Bayesian, *Measurement*, 72, 32-36.
- Karabatak, M., & Ince, M. C., 2009, An expert system for detection of breast cancer based on association rules and neural network, *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3465-3469.
- Karabulut, E. M., & İbrikçi, T., 2012, Effective diagnosis of coronary artery disease using the rotation forest ensemble method, *Journal of medical systems*, 36(5), 3011-3018.
- Liu, X., Wang, X., Su, Q., Zhang, M., Zhu, Y., Wang, Q., & Wang, Q., 2017, A hybrid classification system for heart disease diagnosis based on the rfrs method, *Computational and mathematical methods in medicine*, 2017.
- Liu, X., & Zeng, Z., 2015, A new automatic mass detection method for breast cancer with false positive reduction, *Neurocomputing*, 152, 388-402.
- Long, N. C., Meesad, P., & Unger, H., 2015, A highly accurate firefly based algorithm for heart disease prediction, *Expert Systems with Applications*, 42(21), 8221-8231.
- Mitra, S., & Pathak, P., 1984, The nature of simple random sampling, *The Annals of Statistics*, 1536-1542.
- Nahar, J., Imam, T., Tickle, K. S., & Chen, Y.-P. P., 2013, Computational intelligence for heart disease diagnosis: A medical knowledge driven approach, *Expert Systems with Applications*, 40(1), 96-104.
- Organization, W. H. 2017, Cardiovascular diseases (CVDs), Retrieved from https://www.who.int/cardiovascular_diseases/en/
- Özşen, S., & Güneş, S., 2008, Effect of feature-type in selecting distance measure for an artificial immune system as a pattern recognizer, *Digital Signal Processing*, 18(4), 635-645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2007.08.004>
- Polat, K., & Güneş, S., 2009, A new feature selection method on classification of medical datasets: Kernel F-score feature selection, *Expert Systems with Applications*, 36(7), 10367-10373. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.01.041>
- Robnik-Šikonja, M., & Kononenko, I., 2003, Theoretical and empirical analysis of ReliefF and RReliefF, *Machine learning*, 53(1-2), 23-69.
- Saygılı, A., 2018, Classification and Diagnostic Prediction of Breast Cancers via Different Classifiers, *International Scientific and Vocational Studies Journal*, 2(2), 48-56.
- Spekowius, G., & Wendler, T. 2006, *Advances in healthcare technology: shaping the future of medical care* (Vol. 6): Springer Science & Business Media.
- Subbulakshmi, C., Deepa, S., & Malathi, N., 2012, *Extreme learning machine for two category data classification*, Paper presented at the Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), 2012 IEEE International Conference on.
- Şahan, S., Polat, K., Kodaz, H., & Güneş, S., 2005, *The medical applications of attribute weighted artificial immune system (AWAIS): diagnosis of heart and diabetes diseases*, Paper presented at the International Conference on Artificial Immune Systems.
- Takci, H., 2018, Improvement of heart attack prediction by the feature selection methods, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26(1), 1-10.
- UCI Machine Learning Repository, Statlog (Heart) Data Set Retrieved from <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Statlog+%28Heart%29>
- Wang, P., Hu, X., Li, Y., Liu, Q., & Zhu, X., 2016, Automatic cell nuclei segmentation and classification of breast cancer histopathology images, *Signal Processing*, 122, 1-13.
- Wang, S.-j., Mathew, A., Chen, Y., Xi, L.-f., Ma, L., & Lee, J., 2009, Empirical analysis of support vector machine ensemble classifiers, *Expert Systems with Applications*, 36(3, Part 2), 6466-6476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.041>
- Yilmaz, N., Inan, O., & Uzer, M. S., 2014, A new data preparation method based on clustering algorithms for diagnosis systems of heart and diabetes diseases, *Journal of medical systems*, 38(5), 48.



ÇÖZELTİ MADENCİLİĞİ YÖNTEMİYLE KAYA TUZU ÜRETİMİ

¹Niyazi BİLİM , ²Emre KARAKAYA 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

² Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹nbilim@ktun.edu.tr, ²ekarakayamr@gmail.com

(Geliş/Received: 23.01.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.08.2020)

ÖZ: Tuz, tüm canlılar için önemli bir maden kaynağı olmasının yanında tıp, kimya, ilaç, deri, tarım vb. birçok endüstride kullanılmaktadır. Tuz üretiminde kullanılan madencilik metotları; buharlaştırma, yeraltı madenciliği ve çözelti madenciliği olarak üç çeşittir. Çözelti madenciliği ile tuz üretim teknolojisinin kullanımı dünyada son yıllarda teknolojinin gelişimine bağlı olarak artmıştır. Madencilik sektöründe son derece güvenli, teknolojik ve çevre dostu bir yöntem olan çözelti madenciliği yöntemi ile çözücüsü genelde su olan tuz, soda vb. minerallerin işletilmesi oldukça ekonomik olmaktadır. Genellikle jeolojik ve epirojenik hareketlerle belli bir yönden bağlantısı kesilen bir iç deniz çukurunun dolmasıyla yüzlerce metre aşağıda oluşan halit domundan tuz üretimi, boru hattından pompalar yardımıyla tatlı su gönderip tuzun çözdürülmesini sağlayarak tuzlu su eriyiği elde edilmesiyle sağlanmaktadır. Bu çalışmada, tuz madeninde uygulanan çözelti madenciliği ile ilgili bilgilere ilaveten yeraltında oluşan tuz domlarından çözelti madenciliği yöntemiyle tuzun nasıl kazanılacağına dair açıklamalar, şekiller ve kaynaklara yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çözelti madenciliği, kaya tuzu, kaverna, sondaj

Rock Salt Production by Solution Mining Method

ABSTRACT: Besides being an important mineral resource for all living things, salt is used in many industries such as; medicine, chemistry, medicine, leather, agriculture. There are three types of mining methods used in the salt production: evaporation, underground mining and solution mining. The use of solution mining and salt production technology have increased in recent years in accordance with technological development. The solution mining method, which is highly safe, technological and environmentally friendly method in the mining industry, is used for production operations of salt, soda etc., very economically that their solvent is generally water. The production of salt from halite dome, which is formed hundreds of meters below by filling an inland sea pit, which is generally disconnected from a certain direction by geological and epirogenic movements, is provided by sending fresh water with the help of pumps from the pipeline, and by dissolving the salt by obtaining salt water solution. In this study, information about solution mining applied to salt mine is given and there are explanations, figures and sources about how to gain salt from underground salt domes by solution mining method.

Key Words: Solution mining, rock salt, Cavern, drilling

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tuz, eski çağlardan beri insan hayatı için hayati bir öneme sahip olup, ilk başlarda yemeklerde, yiyeceklerin korunmasında ve derilerin tabaklanmasında kullanılmıştır. Günümüzde birçok kullanım alanında önemli bir yere sahip olarak, önemi halen devam etmektedir. Kimya sanayisinin gelişmesiyle birlikte tuz çok çeşitli alanlarda kullanılmaya başlamıştır. Gıda endüstrisindeki kullanımlarının yanı sıra boya sanayisinde, kâğıt üretiminde, buz çözme işleminde, soda külü üretiminde ve sondaj işlemlerinde kullanılmaktadır. Tuzun elektrolizi sonucunda ortaya çıkan klor ve sodyum hidroksit, kimya endüstrisi için temel kaynaktır. Klor plastik, böcek ilacı bazı bileşiklerin üretilmesinde gereklidir. Tuz ya doğrudan ya da dolaylı yoldan 14 000'den fazla uygulamada kullanılmaktadır. Tuzun kullanıldığı alanları üç ana başlıkta toplayabiliriz: kimyasal kullanımlar, otoyol buz çözme ve gıda sanayi. Endüstri ülkeleri, tuz tüketiminin %50'sini kimya sanayisinde, %30'unu otoyol buz çözmede ve geriye kalan dilimi ise gıda sanayisinde kullanmaktadır (Geertman, 2000).

Tuzlar, denizlerden, göllerden ve yeraltındaki kaya tuzlarından elde edilmektedir. Tuz üretimi temelde üç ana yöntemle üretilmektedir: Buharlaştırma (evaporasyon), yeraltı madenciligi (oda-topuk yöntemi ile ve delme-patlatma veya mekanize kazı sistemi uygulanarak) ve çözelti madenciligidir. Yeraltı madenciligi oldukça pahalı bir yöntem olduğu için çözelti madenciligi yöntemi yeraltı madenciligi yöntemine alternatif bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemin teknolojisi sürekli olarak gelişmekle birlikte yöntemin madencilikte kullanılmasına karşı ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere birçok madencilik işletmelerinde bu yöntem kullanılmaktadır (Amerika Birleşik Devletleri'nde Wyoming Bölgesi, Türkiye Beypazarı (Ankara) trona işletmesi, Soda Sanayi A.Ş. (Seyhan-Adana) kaya tuzu işletmesi, Seltaş A.Ş. (Cihanbeyli-Konya) kaya tuzu işletmesi gibi kurumlar madencilikte çözelti madenciligi yöntemini kullanan firma ve bölgelere örnektir).

Yeraltında yer alan hammadde yatağına sondaj kuyuları açılmasıyla çözelti madenciligi süreci başlatılmaktadır. Bu kuyularda bir muhafaza borusu yer almakta ve muhafaza borusunun içinde ayrı bir iç boru yerleştirilmektedir. Muhafaza boruları ile iç boru arasından (annülüsten) hammaddeye tatlı su verilir ve hammaddenin çözülmesi gerçekleştirilir. Çözünen hammadde-tatlı su çözeltisi iç borudan pompalarla yeryüzüne aktarılır. Daha fazla sondaj kuyusu açılarak bu kuyular direkt ve indirekt (ters) şekilde bağlanarak yeraltındaki hammadde kazanılabilmektedir (Ersoy ve Yünsel, 2001).

Çözelti madenciligi yönteminde, çözücü olarak genelde su kullanılmakta olup, genellikle tuz, kükürt ve trona gibi minerallerin işletilmesinde kullanılmaktadır. (Pike, 1945; Pike ve Seaton, 1953; Jessen, 1973; Shock ve Conley, 1974; Lefond ve Jackoby, 1983; Folle, 1985; Frint ve ark., 1993; Frint ve Copenhafer, 1993; Copenhafer ve ark., 1994; Nasün-Saygili ve Okutan, 1996; Haynes, 1997; Haynes ve Ukidwe, 1998). Yöntemin en büyük avantajı, diğer madencilik yöntemlerinde görülen büyük hafriyatlara gerek olmaması, atık ve pasanın madenin olduğu yerde bırakılması ve bunlardan kaynaklanan düşük üretim maliyetidir.

Tuz, trona vb. gibi mineraller yeraltında belli bir en, boy ve kalınlığa sahip olarak birikmiş veya çökelmiştir. Bu birikim ve çökeltme dom olarak ifade edilmektedir. Çözelti madenciligi yönteminde sondaj boruları aracılığıyla tuz domuna gönderilen çözücü tuzu çözmekte ve çözülen alanda zamanla bir boşluk oluşmaktadır. Tuz domunun bulunduğu bu alan bir anlamda mağara şekli oluşturur. Mağara kelimesi İngilizce'de "cavern" olarak adlandırılır ve Türkçeye "kaverna" olarak geçmiştir. Günümüzde tuz domunda oluşan kaverna içerisine çözücü aktarma yönteminin en pratik yöntemi çözücü kaverna içine basacak pompalardır. Pompalar çözücü belli bir basınçla sondaj kuyusu içerisinden tuz domunda oluşan kavernaya basmakta ve aynı basıncı kullanarak tamamen tavana kadar çözelti ile dolu olan kavernadan tuzlu suyun geri kazanılmasını gerçekleştirmektedir. Kavernanın tavanındaki erime hızı, kaverna duvarlarındaki erime hızına kıyasla daha fazladır. En uygun kaverna şeklini yakalamak ve kaverna tavanını istenilen seviyede tutmak için öz kütlesi çözücünden düşük olan sıvı ya da gaz fazındaki bir izolasyon maddesi kaverna içine enjekte edilerek kaverna tavanı izole edilmektedir. İzolasyon maddesi muhafaza borusu ve dış üretim borusu arasındaki boşluktan enjekte edilerek kaverna tavanının hemen altında konumlanır. Bu eritme yöntemi tavan izolasyonunun kontrolü ile eritme olarak tanımlanmaktadır. Pratikte uygulanan izolasyon maddeleri aşağıda yer almaktadır (Kunstman ve ark., 2007).

- Fuel oil
- Mazot, ham petrol, petrol veya sıvı propan-bütan(kavernanın bu maddeleri için depo olarak kullanılacağı durumlarda)
- Sıkıştırılmış hava
- Sıkıştırılmış azot

En yaygın kullanılan izolasyon sıvısı fuel oildir. Fuel oil maliyetinin düşük olması, sıkıştırılabilirliğinin düşük olması, kavernadan neredeyse tamamının geri alınabilir olması gibi avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Bir kısmının kaverna duvarlarında kalması gibi dezavantajından dolayı fuel oil yerine gaz kullanımı da mevcuttur (Kunstman ve ark., 2007).

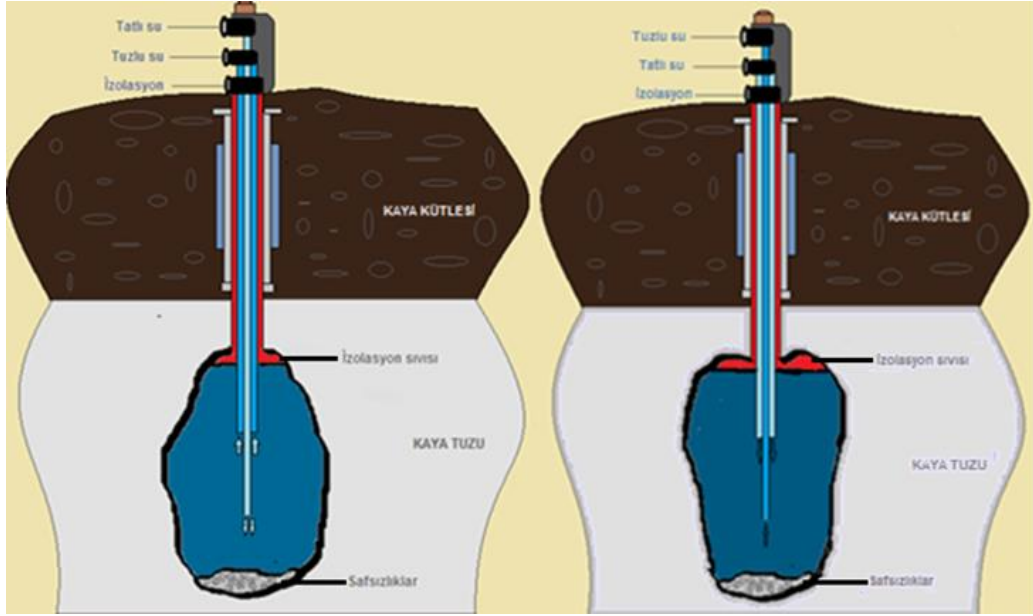
Tavan izole edilerek eritme işleminin uygulanmasında çözücü ve çözelti, sabitlenmiş dikey tek eksenli iki çift üretim borusu dizisi (iç ve dış üretim boruları) içerisinden tuz domunda oluşan kavernaya giriş çıkış yapmaktadır. Çözücü iç üretim borusundan kavernaya gönderilirken, çözelti iç ve dış üretim borusu arasındaki boşluktan geri kazanılmaktadır. Bu işlem direkt sirkülasyon olarak tanımlanmaktadır. Direkt sirkülasyon uygulamasında üretim borusunun en alt seviyesinden yani kaverna tabanından kaverna tavanına doğru bir erime gerçekleşerek düzenli bir şekle sahip kaverna oluşmaktadır (Bastacioğlu, 2010).

Çözücünün iç ve dış üretim borusu arasındaki boşluktan gönderilmesi ve elde edilen çözeltinin iç üretim borusundan geri kazanılması ise indirekt sirkülasyon olarak tanımlanmaktadır. Bu uygulamada düzenli gelişen kısım kavernanın dış üretim borusu üstünde kalan bölümüdür. İç ve dış üretim borusunun en alt seviyeleri arasında kalan bölüm ise ters koni geometrisini almakta olup, alınan çözeltinin konsantrasyonu yüksektir ve istenilen konsantrasyon verimini elde etmek olasıdır.

Direkt sirkülasyon uygulaması kavernada düzenli bir geometrinin oluşmasını sağlarken, ters sirkülasyon uygulaması, yüksek konsantrasyon oluşumunu sağlamaktadır (Şekil 1). Bu avantajların her ikisini birden kullanabilmek için ters sirkülasyon yöntemini ve üretim borusu alt seviyeleri birbirine yakın versiyonu uygulamak gerekmektedir (Bastacioğlu, 2010).

Ters sirkülasyon metodunda çözücünün kaverna tavanının altına gönderilmesi nedeniyle kavernanın üst kısmında bırakılan toprakların erimesine ve bu nedenle kavernanın eritme bölgesinin tabanında üretilmesi istenmeyen bir ters koni şeklini meydana getirmektedir. Bu yöntemin uzun süreli uygulanması ancak iki başlangıç kavernasını birleştirmek amaçlı kullanılabilir.

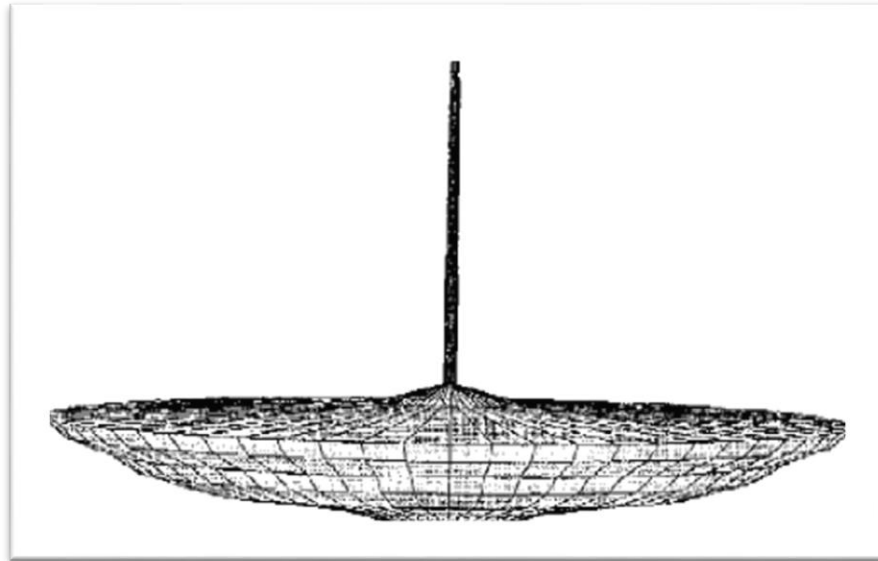
Eritme işlemi yatay ve dikey doğrultuda olmak üzere iki farklı şekilde olabilmektedir (diğer tüm yönlerde de eritme yapılabilir). Kaverna tavanından kaverna tabanına doğru eritme dizaynı uygulanmamaktadır. Genellikle eritme şekli kavernanın alt seviyelerinden başlanarak, kaverna tavanına doğru eritme şeklindedir. Standart eritme dizaynında kaverna taban bölgesi eritme işleminin başlangıç noktası olup, kaverna tavanına kadar olan işletim şeklindedir. Yatay eritme yöntemi kavernanın işletilmeye başlandığı ilk aşamada uygulanmaktadır. Bu nedenle ilk aşamaya aşama "başlangıç kavernası" olarak tanımlanır (Thoms ve Gehle, 1993).



Şekil 1. Düz sirkülasyon (solda) ve ters sirkülasyon (sağda) yönteminin genel görünüşü

Figure 1. General view of straight circulation (left) and reverse circulation (right) method

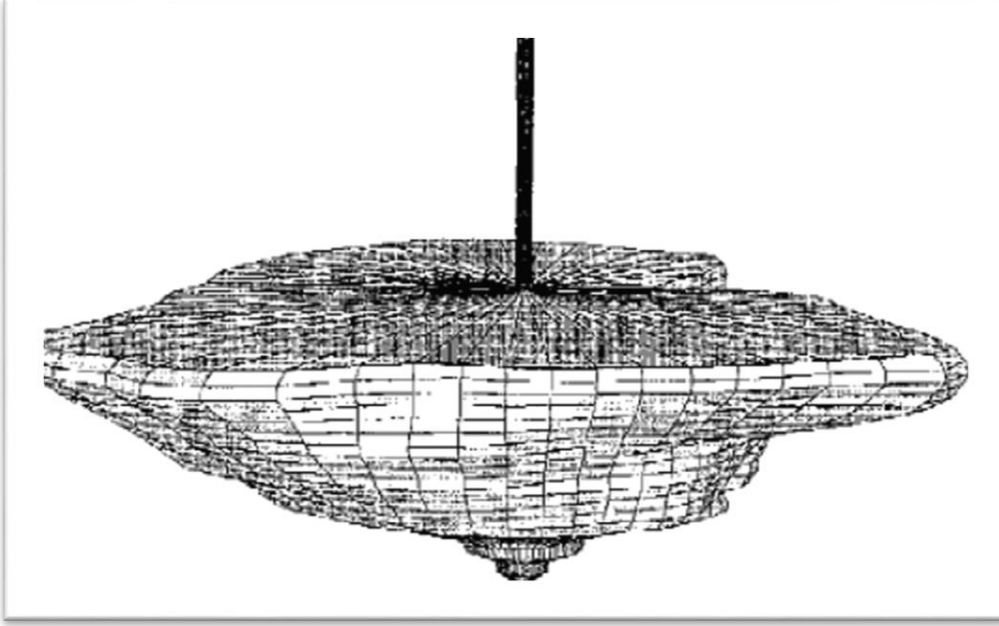
Daha alt seviyede bulunan iç boru, önceden eritilen seviyenin tavan kısmına çekilmekte ve eritme bölgesinin yeni tavanı aynı anda izole edilmektedir. Ancak yatay eritme yönteminin uygulanması işleminde yüksek tuz içeriğine sahip çözelti elde etmek çok zordur. Kuyular açılıp başlangıç kavernası oluştuktan birkaç ay sonra yılda en az bir sonar ölçüm yapılmalıdır. Yeraltının yüzlerce metre altında oluşturulan kavernanın geometrik şeklinin belirlenip tuz üretiminin optimum seviyede sağlanması ve harcamaların (elektrik, pompa ve motor değişim masrafları vs.) doğru ve yerinde kullanılması için eritmenin dizaynı kontrol altında tutulmalıdır. Şekil 2’de ideal başlangıç kaverna geometrisi gösterilmektedir.



Şekil 2. İdeal şekle ulaşmış başlangıç kavernası (Kunstman ve ark., 2007).

Figure 2. Starting cavern that has reached the ideal shape (Kunstman et al., 2007).

Şekil 3'te ise belli bir yüksekliğe sahip ideal kaverna geometrisi görülmektedir. Bu ideal kaverna geometrisini sağlamak için eritme teknoloji elemanlarını sonar ölçüm sonuçlarına göre doğru bir şekilde kullanılmalıdır.



Şekil 3. Belli bir yüksekliğe ulaşmış ideal kaverna geometrisi (Kunstman ve ark., 2007).

Figure 3. Ideal cavern geometry that has reached a certain height (Kunstman et al., 2007).

Bir kavernanın işletilmesinde sadece dikey eritme yöntemi kullanılamaz. Kaverna tavanında izolasyon kullanmadan yapılan eritme yöntemi dikey eritmeye en yakın işletme şekli olmaktadır. Bu durumda ise kaverna tavanı tamamen düz gelişecek, zamanla aşağı yönde eğim kazanacaktır. Kavernanın dikey ve yatay gelişimini sağlayan eritme teknoloji elemanları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Üretim borusu dizisinin yer değiştirilmesi
- Tavan izolasyon seviyesinin değiştirilmesi
- Sirkülasyon yönünün değiştirilmesi (direkt-ters sirkülasyon)
- Çözücü sıvının debisinin değiştirilmesi

Kavernanın belli seviyelerinde eritme işlemi süresince istenilen kaverna çapına ulaşıldığında üretim boruları yukarı çekilerek eritme işlemi kavernanın bu seviyesinde durdurulur. Kaverna çapının fazlaca genişlemesi kavernanın çökmesine neden olarak yeryüzünde çökme oluşması meydana getirebilir bu nedenle çapın daha fazla genişlemesi istenmeyen bir durumdur. Kalın tuz domlarında oluşturulan yüksek kavernalarda eritme işlemi gerçekleştirilmek için üretim borularının seviyelerin defalarca değişmesi ile gerçekleşmektedir. Üretim borularının değiştirildiği her seviyede tavan izolasyonu uygulanarak yanıl gelişme sağlanmakta ve kaverna tavan bölgesindeki eritme yavaşlatılmaktadır. Buna ek olarak hedef kaverna çapına ulaşıldığında yanıl gelişmeyi durdurmak gerekmektedir. Bunu sağlamak için üretim boruları yukarı bir seviyeye çekilerek, kavernanın alt bölgesinde eritme işlemi yavaşlatılmaktadır. Bununla birlikte kuyunun daha önce izole edildiği üst bölgeden bir miktar izolasyon sıvısı geri çekilir ve istenilen eritme bölgesinin tavanında izolasyon yapılır. Böylelikle yeni bir eritme aşaması için tavan yönünde ilerleme sağlanmaktadır (Kunstman ve ark., 2007).

MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Kaya Tuzu Jeolojisi ve Mineral Oluşumu (Rock Salt Geology and Mineral Formation)

Kaya tuzu oluşumu paleocoğrafya ile ilgilidir. Yerin yüzlerce metre altında oluşan kaya tuzu, Zechstein (sığ bir denizde oluşan jips ve anhidritin oluşturduğu yataklanma) tipi yaygın bir sığ deniz veya Akdeniz gibi bir okyanusal evaporit oluşumu olabildiği gibi epirojenik hareketlerle herhangi bir yönden bağlantısı kesilen bir iç deniz çukurunun dolmasıyla da oluşabilmektedir.

Tetis adındaki eski bir okyanusun III. Jeolojik zamanda gerçekleşen levha hareketlerine bağlı olarak ve Afrika-Avrasya kıtasının çarpışması sonucu denizel alanlar giderek daralmış ve bugünkü Akdeniz meydana gelmiştir. Orta Jura jeolojik zamanda Afrika plakası, Avrupa plakasına göre kuzeye doğru hareket ederek Alpin dağ oluşum başlangıcına ve Tetis okyanusun büyük bir kısmının yok olmasına neden olmuştur. Alpin dağ oluşumundan sonra yeni Akdeniz Havzaları meydana gelmiştir ve Atalntik ve Indo-Pasifik arasındaki bağlantı Burdigaliyen döneminde bu iki kıtanın Ortadoğu boyunca birleşmesi sonucu kesilmiştir. Genç Miyosen döneminde ise, Afrika ile Avrupa arasındaki son açıklık olan Betik ve Rif geçitleri de kapanmıştır. Bu olaylar sonucunda Akdeniz'e su gelişi kesilmiş ve buna bağlı olarak Akdeniz için bir kriz başlamıştır. Bu kriz sonucu Akdeniz Havzalarında jips, anhidrit ve kaya tuzundan oluşan evaporitler çökelmiştir. Bu olaya "Messiniyen Tuzluluk Krizi" ya da okyanusal evaporit oluşumu denmektedir (Benson ve ark., 1991).

Epirojenik hareketlerle bağlantısı kesilen bir iç deniz çukurunun dolmasıyla oluşan kaya tuzu oluşumunda deniz daha sonra geri çekilmesi sonucu tamamen gerileyerek daralmış durumda, yerine karasal ve sıcak iklim koşullarına ve bu koşullarda oluşan açık denize bağlı geçici göllere (lagün) bırakmıştır. Bu lagüner tortullaşmada kurak ve yarı kurak iklim koşullarında, buharlaşma sonucu kalın karasal seriler, kil marn tortulları ve jips yatakları oluşmuştur. Denizin çekilmesiyle oluşan dağlar arasındaki çorak basenlerde tuzlu bataklık ve göller meydana gelirken, akarsuların yataklarında da kırıntılı oluşuklar depolanmış, playa denilen çukurlarda jips ve diğer evaporitler çökelmiştir.

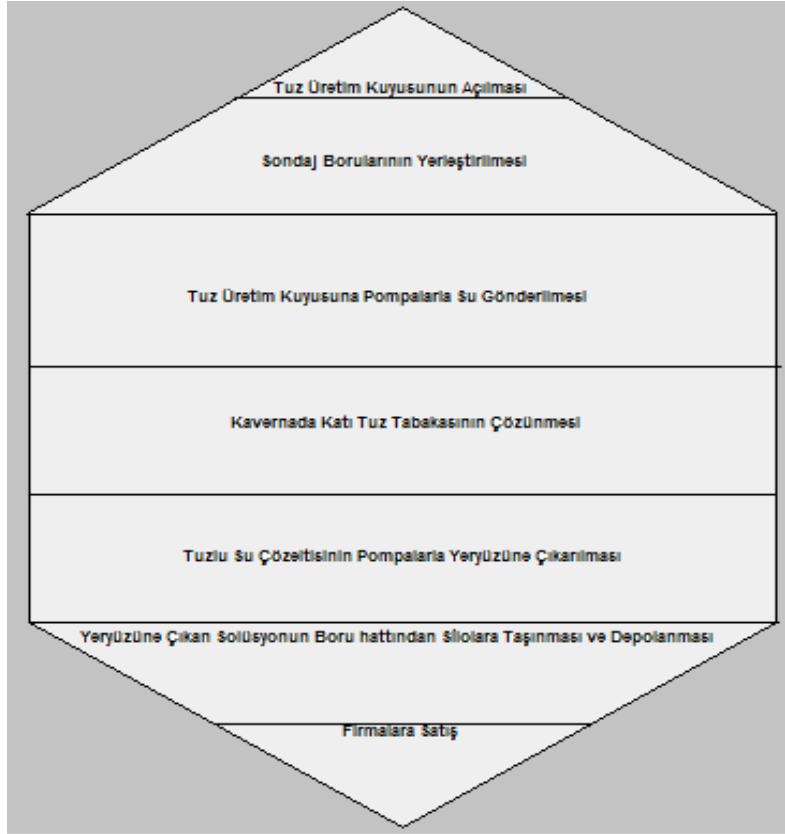
Yerin yüzlerce metre altındaki kaya tuzu homojen bir yapıya sahip olmamasından dolayı yer yer kil bantları içerebilir. İçerdiği bu killerden dolayı kaya tuzunun rengi kirli beyaz olup saydamlığı değişebilmektedir. Bununla birlikte tuz katmanları arasında, killer ve marnlar, ince kristalli jips mineralleri yer alabilmektedir.

Tuz cevheri olma olasılığı olan bölgede içme ya da kuyu sularına kimyasal analiz testi uygulandıktan sonra rezerv ve tenör miktarının öğrenimi için belli kuruluşlarca sondaj çalışmasının yapılması şarttır. Yapılacak olan tuz arama faaliyetleri sonucu; çalışma alanında yapılan çalışmalarda yeryüzünün yüzlerce metre altında kaya tuzu tabakası varlığı neticesinde, sondaj işlemleri sonucunda alınan karot numunelerine uygulanan analizler sonucunda; üretilmeye elverişli rezerv ve kalitede kaya tuzu rezervi tespit edilebilirse tuz üretim faaliyetlerine geçilebilmektedir. Yapılan çalışmalar ve analizler sonucu kaya tuzunun ortalama bileşimini genellikle Ca^{+2} , Mg^{+2} , NaCl, suda erimeyen madde, SO_4 ve nem gibi iyonlar ve maddeler oluşturmaktadır.

Çözelti Madenciliği Yöntemiyle Kaya Tuzu Üretiminde İş Akım Şeması (Flow chart in Rock Salt Production by Solution Mining Method)

Kaya tuzu işletme alanında tuz üretimi için sondaj kuyuları yardımı ile çözelti madenciliği yöntemi uygulanmaktadır. İşletme kapsamında üretim sırasında; tuz tabakasına kadar uygun aralıklarla sondaj kuyuları açılarak, muhafaza borularının yerleştirilmesi ve çimentolama işlemi yapılmaktadır. Sondaj işlemi, tuz tabanına kadar devam etmelidir.

Eritme için kullanılan su, tuz yatağına kuyuda kullanılan üretim borularının içerisinden aktararak, kuyunun çıplak kısmında tuzun çözdürülüp tuzlu su konsantrasyonu artırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Eritmenin bir sonucu olarak, eritilen bu bölgede kaverna gelişmiş olup, madencilik faaliyeti sonrasında elde edilen tuzlu çözelti, çözücünün kuyu içerisine girdiği basınç sayesinde yine üretim boruları aracılığı ile yeryüzüne taşınmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Çözelti madenciliği ile kaya tuzu üretim akış şeması

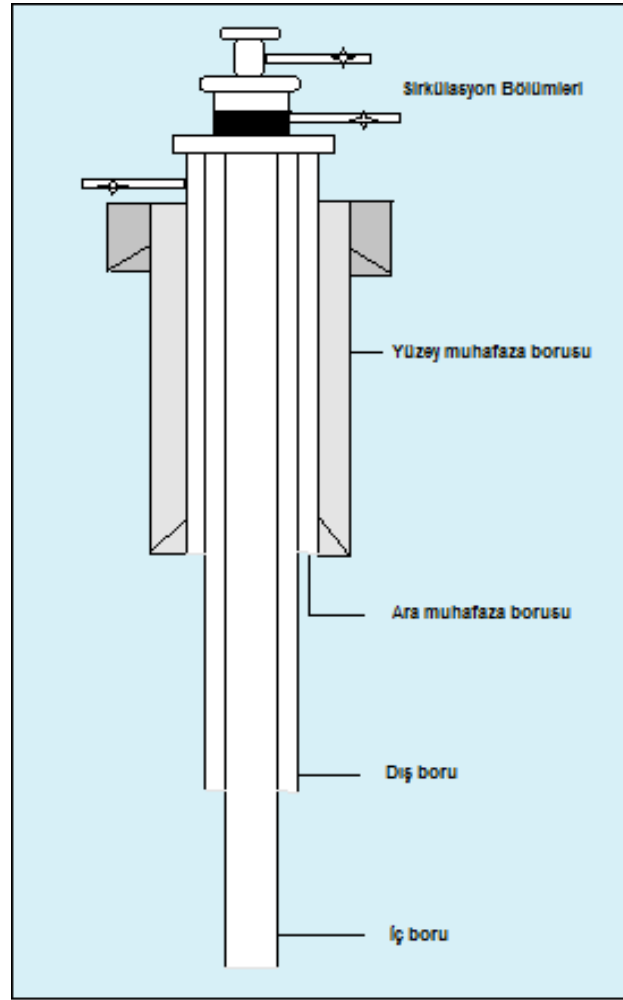
Figure 4. Solution mining and rock salt production flow chart

Çözelti Madenciliği Yönteminde Kullanılan Teknoloji (Technology Used in Solution Mining Method)

Kaya tuzunun çözelti madenciliği yöntemiyle üretildiği işletmelerde alandaki tuz oluşumu katı halde tabaka halinde ve yaklaşık olarak yüzeyden birkaç yüz metre derinlikte başlamaktadır. Kuyuların toplam tuz kalınlığı yaklaşık olarak birkaç yüz metre arasında değişmektedir. Yaklaşık 40-50 m'lik tuz tabakası emniyet olarak yerinde bırakılmış olup üretim, tuz tabakasının 40-50 m altından başlanır.

Tuz tabakaları arasında yer yer değişik kalınlıklarda kil bantları bulunmakta olup tuz tabakasına kadar sondaj kuyuları açılarak, muhafaza borularının yerleştirilmesi ve çimentolama işlemi yapılmaktadır. Sondaj işlemine tuz tabanına ulaşılan kadar devam edilmektedir. Kuyuya iç boru (üretim veya besleme) yerleştirilmektedir.

Çözelti madenciliği işleminde; yeraltındaki hammadde yatağına kadar sondaj kuyuları açılmaktadır. Bu kuyulara casing (koruma boruları) ve iç boru yerleştirilmektedir. Kuyu işlemi tamamlandıktan sonra kuyunun göçmesini önlemek, kuyuya gönderilen tatlı suyun ve kuyudan yeryüzüne gelen tuz çözeltisinin formasyona kaçmasını önlemek için tuz tavanına kadar muhafaza boruları (casing) indirilmektedir. Koruma borularının çapı kuyu çapına yakın olup kuyu çeperinde bulunmaktadır. Bundan sonra çimentolama işlemi uygulanmalıdır. Şekil 5'de sondaj üretim kuyusunun yüzey muhafaza borusu, ara muhafaza borusu, iç boru ve dış boru gibi elemanları yer almaktadır.



Şekil 5. Üretim kuyusunun sondaj dizisi

Figure 5. Drilling string of the production well

Kuyu boşluğuna; serbest iç boru (tubing), tuz tabanından 1-2 m yukarıda kalacak şekilde yerleştirilmektedir. Tuzun çözdürülmesi ve yeryüzüne alınması işlemi, çözelti madenciliğinin iki farklı metodu ile yapılmaktadır. Bunlar direkt ve ters dolaşım yöntemleridir. Çalışma alanında, üretimin ilk başlangıcında direkt dolaşım yöntemi, ileri aşamalarında ise ters dolaşım yönteminin uygulanmaktadır.

Tuzu eritmek için kullanılan su, üretim boruları içerisinde zemin pompalar yardımıyla aktararak kuyunun çıplak kısmında tuz domunun çözülmesiyle tuzlu su çözeltisi üretilmektedir. Madencilik faaliyetleri sonrasında elde edilen tuzlu su çözeltisi, çözeltinin kuyu içerisine girdiği basınç sayesinde yine üretim boruları aracılığı ile yeryüzüne taşınmaktadır. Yeryüzüne taşınan tuzlu su çözeltisi tanklarda birikmektedir. Tanklarda biriken tuzlu su çözeltisi ise pompalar yardımıyla boru hattı üzerinden solüsyon havuzlarına basılmaktadır.

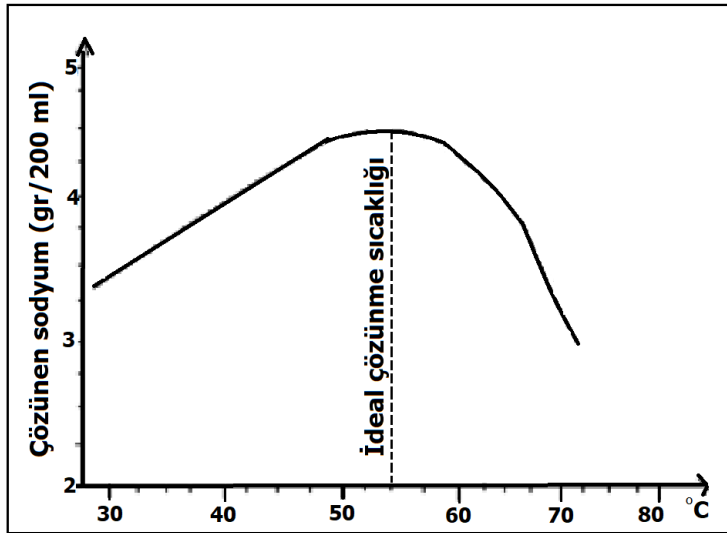
Pompalar kademeli pompa olup motorun ve pompanın tam verimle ve hasar görmeden çalışması için motor-pompa bağlantısını oluşturan kaplin ve kaide ayarı hassas şekilde ayarlanmalıdır. Bu pompalar çözücünün (tatlı su) tuz üretim kuyularına gönderilmesini sağlamaktadır.

Çözelti Madenciliği Yöntemiyle Kaya Tuzu Üretiminde Çözünen Sodyum Miktarı ile Çözücü Sıcaklığı Arasındaki İlişki (The Relationship Between Solvent Temperature and Soluble Sodium Amount in Rock Salt Production by Solution Mining Method)

Tuz üretim kuyu kavernalarına gönderilen çözücü, kaverna içinde kaldığı zamana göre çözünen sodyum (Na) miktarı da artmaktadır. Tuzlu çözeltinin doygunluk derecesiyle, çözünen sodyum miktarı

ters orantılı olarak değişmektedir. Bu durum kısaca açıklanacak olursa, üretim sistemine bağlı olarak iç boru ile dış boru arasında hareket eden tuzlu su çözeltisinin doygunluk derecesi arttıkça, çözünen sodyum miktarı azalmaktadır. Tuzlu su çözeltisinin yeterince doygun hale gelmesi, iç boru ile dış boru arasındaki mesafeye bağlıdır ve genellikle bu mesafe tuzlu su çözeltisinin doygun hale geleceği mesafeye göre ayarlanmaktadır. Tuz üretim kuyusundan yüzeye çıkan tuzlu su çözeltisinin yoğunluğu, sürekli olarak boume metre ile ya da yoğunlukölçer cihazları ile ölçülür. Yeterince yoğun tuzlu çözeltisi gelmemesi halinde, tuz üretim kuyularına pompalanan tatlı su debisi düşürülür ve tatlı suyun, tuz üretim kuyusunda kalma süresi artırılarak tuzlu su çözeltisinin yeterli doygunluğa erişmesi sağlanmaktadır.

Tuz üretim kuyu kavernasına gönderilen tatlı suyun sıcaklığı belli bir dereceye çıkartıldıkça çözünen sodyum miktarı da artmaktadır. Ancak tatlı su sıcaklığı belli bir dereceyi aştıktan sonra çözünen sodyum miktarı azalmaktadır. Çünkü belirli bir sıcaklık değerinde çözünen sodyum miktarı, doygunluk seviyesine ulaşmaktadır. Yaklaşık 50-55 °C'den sonraki sıcaklık değerlerinde çözünen sodyum miktarı azalmaktadır. Sonuç olarak tuz üretim kuyularına gönderilen çözücü sıcaklığı 50-55 °C'yi aşmamalıdır (Şekil 6). Çözücü olarak gönderilen tatlı su sıcaklığını artırma işlemi maliyetli olduğu için tuz üretim kuyularına gönderilen tatlı su sıcaklığı, atmosfer sıcaklığında olmaktadır (Ersoy ve ark., 2001).



Şekil 6. Çözünen sodyum miktarı ile çözünme sıcaklığı arasındaki ilişki

Figure 6. Relationship between dissolved sodium and dissolution temperature

SONUÇ VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Çözelti madenciliği yöntemi, çözücüsü genelde su olan tuz, trona gibi madenlerin işletilmesinde teknolojik, ekonomik ve iş güvenliği açısından oldukça güvenli bir yöntemdir. Yeraltındaki maden yatağına sondaj kuyuları açılması ve bu sondaj boruları içinden çözücünün pompalarla gönderilmesiyle yeraltındaki oluşumun erimesi sonucu kaverna oluşumunu sağlayarak çözeltinin oluşan kavernaya dolup üretim boruları aracılığıyla yeryüzüne alındığı yani endüstriyel hammaddenin kazanıldığı yöntem "çözelti madenciliği" olarak tanımlanmaktadır.

Çözelti madenciliği yöntemin tuz, kükürt ve trona gibi hammaddelerin işletilmesinde son derece güvenli, teknolojik ve çevre dostu bir yöntemdir. Bununla birlikte yöntemin en büyük avantajı, diğer madencilik yöntemlerinde görülen büyük miktarlarda dekapaj malzemesinin ortaya çıkmaması, çözelti madenciliği yöntemi ile elde edilen tuzlu su çözeltisinin rafine işlemi sonrası elde edilen atık (kil, CaCO₃, MgCO₃ vb.) içeren malzemenin kavernaya gönderilmesi ve bunlardan kaynaklanan düşük maliyetli bir faaliyet oluşudur. Ayrıca bu tür madenlerde yeraltı madenciliğine alternatif olarak geliştirilen çözelti madenciliği yöntemi iş sağlığı ve güvenliği açısından oldukça risksiz bir çalışma ortamı sunmaktadır.

Çözelti madenciliği yönteminde, başlangıç kavernası oluşturulan üretim kuyusuna yılda en az bir sonar ölçüm yapılmalıdır. Sonar ölçüm sonucunda kuyu kavernasının 3 boyutlu şekli, kaverna çapı ve derinliği, kaverna da çökme olup olmadığı, iç-dış tubing üretim borularında eksiklik, deforme vb. gibi durumların olup olmadığı gibi önemli bilgilere ulaşılmaktadır. Bu bilgiler ışığında, üretim prosesi mühendislik hesaplamalarına göre yeniden revize edilerek üretim verimi, üst düzeye çıkarılmalıdır. Buna ek olarak tatlı su ya da geri dönüş suyunu (rafine işleminden elde edilen atık su) kavernaya pompalayan pompalar, üretilen maddeye uygun olarak seçilmelidir ve pompa emme hattına gelen suyun (tatlı su, rafine sonrası atık su vb.) içinde yer alması olası yabancı maddelerin pompa elemanlarına zarar vermemesi için filtrelerden (basket tipi ya da kova tipi) geçirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bastacioğlu, B. G., 2010, Tuz Tabakalarında Çözelti Madenciliği ve Oluşan Boşlukta Doğalgaz Depolama İmkanlarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi.
- Benson, R.H., El Bied, K.R., and Bonaduce, G., 1991. An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian- Messinian Boundary: The End of Tetyhs Ocean. *Palaeoceanography*, 6 (1), 164-192.
- Copenhafer, W. C., Smith, D. E. ve Niedringhaus, G. F., 1994, Process for producing sodium salts from brines of sodium ores, Google Patents.
- Ersoy, A. ve Yünsel, T., 2001, Çözelti madenciliği ile tuz üretimi.
- Folle, S., 1985, Geological Conditions for The Construction of Salt Caverns. *Salts & Brines' 85, Proceedings of The Symposium-Solution 'Mining of Salts and Brines, New York. '*
- Frint, W. R., Bithell, M. ve Fischer, W. G., 1993, Soda Ash Production. U.S. Patent No: 5, 192, 164, (Mar. 9, 1993).
- Frint, W. R. ve Copenhafer, W. C., 1993, Process for Producing Sodium Salts from Brines of Sodium Ores. U.S. Patent No: 5, 262,134.
- Geertman, R., 2000, Sodium chloride: Crystallization, Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 4127-4134.
- Haynes, H., 1997, Solution mining of Wyoming Trona, SPE Rocky Mountain regional meeting.
- Haynes, H. W. ve Ukidwe, A., 1998, A Model for Solution Mining Trona. Wyoming State Geological Survey Public Information Circular, 40,153-161.
- IPT Akaryakıt Malz. Petrol Kimya San. ve Tic. Ltd. Şti., 2008, Akaryakıt Pompası Kullanım ve Bakım Kılavuzu.
- Jessen, F. W., 1973, Specialized Underground Systems: Solution Mining. SME Mining Engineering Handbook. 2, Editor: Cumins, A.B., The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Eng. Inc., New York.
- Kunstman, A., POBORSKA-MŁYNAŃSKA, K. ve URBAŃCZYK, K., 2007, Solution mining in Salt Deposits, Wyd. AGH, Kraków.
- Lefond, S. J. ve Jackoby, C. H., 1983, Salt In Industrial Minerals and Rocks. Editor: Lefond' S.J. 2:1119-1150.
- Nasün-Saygılı, G. ve Okutan, H., 1996, Application of the solution mining process to the Turkish trona deposit, *Hydrometallurgy*, 42 (1), 103-113.
- Pike, R. D. ve Seaton, M. Y., 1953, Mining Operation, U.S. Patent JSfo: 2,625,384 (January 13, 1953).
- Pike, R. D., 1945, Solution mining of trona, Google Patents.
- Shock, D. ve Conley, F., 1974, Solution Mining-Its Promise and Its Problems, Solution Mining Symposium, FF Apian, WA McKinney, and AD Pernichele, eds., AIME, New York, 79-97.
- Thoms, R. ve Gehle, R., 1993, Feasibility of Controlled Solution Mining From Horizontal Wells, Solution Mining Research Institute.



PATLATMA KAYNAKLI YER SARSINTISI VE HASAR DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ

¹Bilgehan KEKEÇ , ²Dhikra GHILOUFI 

^{1,2} Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü,
Konya, TÜRKİYE
¹bkekec@ktun.edu.tr, ²ghiloufi.dhikra@gmail.com

(Geliş/Received: 26.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 16.08.2020)

ÖZ: Patlatmalı işlemleri madencilik, tünel açma faaliyetleri, inşaat ve yıkım işlemleri ve enerji sektörü gibi birçok sektörde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem hız ve ekonomik yönden çok verimli bir yöntem olmasına rağmen çeşitli çevresel etkilere ve büyük hasarlara neden olabilmektedir. Çevreye verilen olumsuz etkilerin en önemlisi zemin titreşimleri olup, oluşan titreşimin şiddetine ve etki alanına göre maddi kayıplara ve hatta can kayıplarına sebep olabilmektedir. Bu sebeple muhtemel etkilerin en aza indirilmesi ya da en iyi ihtimalle bertaraf edilmesi için patlatma faaliyetlerinde zemin titreşimlerinin özel olarak irdelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada patlatmadan kaynaklı zemin titreşimlerinin özellikleri, sınıflandırılması ve temel büyüklükleri sunulmuştur. Ayrıca, yer sarsıntısının yapılar üzerinde oluşturduğu hasarlar, insanlar üzerindeki olumsuz etkiler ve insan algısı ile yapısal hasar arasındaki ilişki detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Ayrıca, patlatmadan kaynaklanan sismik dalgalar, arazi katmanları ve yapılar arasındaki etkileşimler irdelenmiş ve Parçacık Hızı (PPV), Bileşke Vektörel Toplamı PVS (Peak Vector Sum), parçacık yer değiştirmesi, parçacık ivmesi ve frekans başta olmak üzere yer sarsıntısı hasarının değerlendirilmesinde sıkça kullanılan parametreler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Patlatma, Çevresel etkiler, Yer sarsıntısı, Hasar Parametreleri.

Blast-Induced Ground Vibration and Damage Assessment Parameters

ABSTRACT: Blasting operations are extensively practiced in mining, tunneling activities, construction and demolition projects and the energy sector. However, despite the efficiency of this method in terms of time and costs, blasting operations can generate numerous environmental impacts and major damages. Ground vibration is the most detrimental impact caused by blasting activities as it can cause material loss and even the loss of human lives depending on its intensity and impact area. Thus, ground vibrations should be thoroughly investigated in order to minimize or ideally prevent their possible impacts.

This study examines the characteristics of blast-induced ground vibrations and investigates the properties and types of the body and surface waves resulting from blasting activities. In addition, structural damages caused by ground vibrations, their negative impacts on human health and the relationship between human perception and structural damages are presented in details. Furthermore, the study highlights the interaction mechanisms between seismic waves, ground layers and structures and investigates the most commonly used parameters in the assessment of ground vibration damages i.e. Peak Particle Velocity PPV, Peak Vector Sum PVS, particle displacement, particle acceleration and frequency.

Key Words: Blasting, Environmental impacts, Ground vibration, Damage Parameters.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin gelişmesi ve nüfusun artmasıyla birlikte hammadde gereksinimi de artmaktadır. Artan hammadde ihtiyacı, önceden ekonomik olmayan veya yerleşim yerlerine yakın bölgelerde oluşum gösterdiği için değerlendirilmeyen maden sahalarını da işletmeye açma gereği doğurmuştur. Maden sahalarında bilinen en ekonomik üretim yöntemi delme patlatma yöntemidir (Bilim ve ark. 2016, Singh, 2012, Aksoy ve Yalçın, 1999.). Patlatma, hız ve ekonomik yönden, çok verimli bir yöntem olmasına rağmen, özellikle çalışma bölgesi yakınlarında çeşitli çevresel etkilere ve büyük hasarlara neden olabilmektedir. Böylece yerleşim yerleri, baraj, yol, tünel, boru hattı, sit alanları yakınlarında yapılacak olan üretim patlatmalarında özel tedbirler alınması zorunludur. Çünkü patlatma sonucunda oluşan enerjinin önemli bir kısmı çevresel etkilere neden olan faydasız enerji olarak karşımıza çıkabilmektedir. Patlatmanın neden olduğu temel çevresel sorunlar; titreşim (yer sarsıntısı), hava şoku, toz ve gaz oluşumu, gürültü ve kaya fırlamasıdır (kaya savrulması). Bu çevreye verilen olumsuz etkilerin en önemlisi zemin titreşimleridir. Oluşan bu sarsıntılar tıpkı deprem dalgaları gibi kayaç özelliklerine bağlı olarak çok uzaklara taşınabilme özelliğine sahiptir. Oluşan titreşimin şiddetine ve etki alanına göre hem maddi kayıplara hem de can kayıplarına sebebiyet vermektedir.

Yer sarsıntısı insan rahatsızlığına, hassas ekipmanların arızalanmasına, yapısal hasarlara ve hatta can kayıplarına neden olabilmektedir. Bu sebeple, madencilik ve inşaat kazılarının temelini oluşturan patlatma faaliyetlerinin zemin titreşimlerinin özel olarak irdelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, patlatmadan kaynaklı zemin titreşimlerinin özellikleri, sınıflandırılması ve temel büyüklükleri sunulmuş, yer sarsıntısı hasarının değerlendirmesinde sıkça kullanılan parametreler anlatılmıştır.

PATLATMA SONUCUNDA OLUŞAN YER SARSINTILARI (BLAST-INDUCED GROUND VIBRATIONS)

Yer sarsıntısı, suya düşen taş çarpmalarından dolayı dışa doğru yayılan dalgacıklar gibi patlama noktasından dışarı doğru yayılan bir dalga hareketidir (Elevli & Arpaz, 2010). Bazı referanslar, doğal afetler (depremler, fırtınalar) veya insan kaynaklı (patlatma, inşaat faaliyetleri, trafik, kazılar, nükleer testler ve ulaşım araçları gibi) bir sonuç olarak zemin titreşimini tanımlasa da (Duarte, Misael, & Filho, 2002), genel olarak, herhangi bir doğal fenomen hariç insan kaynaklı faaliyetler tartışılırken zemin titreşimi veya yer sarsıntısı terimi kullanılmaktadır (Srbulov, 2008).

İnsanların rahatsızlığına, hassas ekipmanların arızalanmasına ve yapısal hasarlara neden olabilecek insan yapımı zemin titreşim kaynakları; patlatma, madencilik işlemleri, inşaat faaliyetleri, trafik, petrol arama faaliyetleri, makinelerin çalışması ve nükleer testler gibi aktivitelerden kaynaklıdır. Patlatma etkisiyle oluşan zemin titreşimi diğer insan yapımı kaynaklara kıyasla daha kısa sürmektedir. Ayrıca patlatma sonucunda oluşan zemin titreşimleri daha geniş bir frekans bandı (1-300 Hz) ve daha yüksek parçacık ivmesiyle (0,02-50 m/s²) karakterize edilmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Bazı insan kaynaklı zemin titreşimlerinin özellikleri (ISO, 2010)

Table 1. Characteristics of some man-made ground vibrations (ISO, 2010)

Titreşim kaynağı	Frekans bandı (Hz)	Parçacık hız aralığı (mm/s)	Parçacık ivme aralığı (m/s ²)
Trafik (yol ve demiryolu)	1-100	0,2-50	0,02-1
Patlatma	1-300	0,2-100	0,02-50
Kazı	1-100	0,2-100	0,02-2
Makinalar	1-100	0,2-100	0,02-1

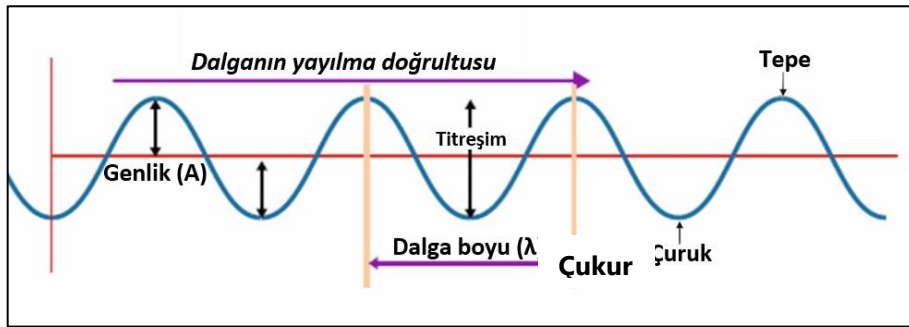
Sismik Dalgaların Özellikleri ve Sınıflandırılması (Properties and Classification of Seismic Waves)

Depremler gibi doğal veya patlatma, trafik faaliyetleri, kazılar ile nükleer testler gibi insan kaynaklı sismik kaynaklardan üretilen enerji (zemin titreşimi), deprem dalgaları aracılığıyla ortamda yayılmaktadır. Sismik dalgalar olarak daha yaygın olarak adlandırılan bu deprem dalgaları mekanik dalgalardır ve sadece maddesel ortamlarda hareket edebilmektedir.

Elastik dalgalar olarak da bilinen bu sismik dalgalar yeryüzünün katmanlarında cisim dalgaları (*body waves*) olarak yayılabilir veya yüzey boyunca yüzey dalgaları (*surface waves*) olarak ilerleyebilir (Wu & Wu, 2008). Cisim dalgaları Birincil (P) ve İkincil (S) dalgaları kapsamaktadır. Yüzey dalgaları ise Rayleigh (R) ve Love (L) dalgalarına ayrılmaktadır (Sudarshan, t.y.).

1.1. Sismik dalgalara ait temel büyüklükler

Sismik dalgaların temel büyüklükleri; Tepe, çukur, genlik (A), dalga boyu (λ), frekans (f), periyot (T), hız (v) ve açısal frekansdır (ω) (Moğulkoç ve ark., 2017) (Şekil 1).



Şekil 1. Sismik dalgaların temel büyüklükleri (Enine Dalgalar için)

Figure 1. The basic magnitudes of seismic waves (for Transverse Waves)

➤ **Tepe (Crest) ve çukur (Trough)** : Enine dalgalar için tepe noktası maksimum pozitif titreşimi gösteren nokta (en üst nokta) ve çukur noktası maksimum negatif titreşimi gösteren noktadır (en alt nokta). Boyuna dalgalar için tepe noktası, sıkışık bölgelere denk gelir ancak çukur noktası seyrek bölgeye karşılık gelmektedir.

➤ **Genlik (A) (Amplitude)**: Genlik, dalganın taşıdığı enerji miktarının bir göstergesidir. Böylece, daha yüksek bir genlik daha yüksek taşınan enerji anlamına gelmektedir ve aynı şekilde düşük genlik, düşük taşınan enerjiyi göstermektedir. Enine dalgalar için genlik, denge pozisyonundan tepe veya çukur noktasına dik mesafedir yani maksimum uzaklıktır. Ancak, boyuna dalgalar için sıkışık ve seyrek bölgeler arasındaki farktır. Boyuna dalgalar için, sıkışma yoğunluğu arttıkça genlik artmaktadır.

➤ **Dalga boyu (λ) (Wavelength)**: Lambda (λ) ile gösterilen ve metre ya da Angström (A^0) cinsinden ifade edilen dalga boyu, enine dalgalar için, iki ardışık tepe veya iki ardışık çukur arasındaki uzaklıktır. Ancak, boyuna dalgalar için, dalga boyu iki ardışık sıkışık veya iki ardışık seyrek bölge arasındaki uzaklıktır.

$$1 A^0 = 10^{-10}m \quad (1)$$

➤ **Frekans (f) (Frequency)**: Hertz (Hz) cinsinden ifade edilen frekans, bir noktadan geçen saniyedeki dalga sayısını temsil etmektedir. Dalga boyu uzadıkça, frekans azalmaktadır.

$$1 \text{ cps (cycle per second)} = 1 \text{ Hz (cps: saniye başına döngü)} \quad (2)$$

➤ **Periyot (T) (Period)**: (T) ile gösterilen ve (s) ile ifade edilen periyot, ortamda bir parçacık tarafından tam bir dalganın tamamlanması için gereken süredir.

➤ **Hız (v) (Velocity)**: Dalganın ilerleme hızı, dalga boyuna ve ortamın fiziksel özelliklerine bağlıdır. (m/s) cinsinden ifade edilen dalganın hızı aşağıda belirtilen formül kullanılarak hesaplanır:

$$v \text{ (m/s)} = f \text{ (Hz)} \times \lambda \text{ (m)} \quad (3)$$

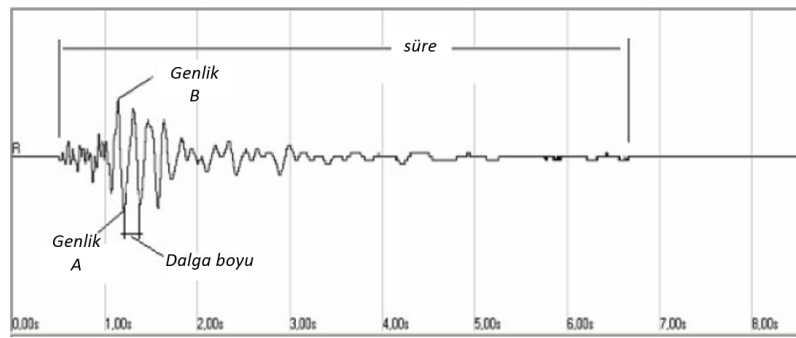
➤ **Açısal frekans (ω) (Angular frequency)**: Açısal frekans radyan/saniye birimi ile ifade edilen frekanstır.

Çizelge 2’de sismik dalgaların büyüklüklerinin arasındaki ilişkileri sunulmaktadır. Şekil 2 bir zaman tanım aralığında patlatma neticesinde oluşan tipik yer sarsıntısının bir örneğini göstermektedir.

Çizelge 2. Dalganın parametreleri arasındaki ilişkiler (Bormann, 2012)

Table 2. Relationships between wave parameters (Bormann, 2012)

Parametre	Simge	İlişkiler
Periyot	T	$T=1/f = 2\pi/\omega = \lambda/v$
Frekans	f	$f= 1/T = \omega/2\pi = v/ \lambda$
Açısal frekans	ω	$\omega= 2\pi f = 2\pi/T = v.k$
Hız	v	$v= \lambda/ f = f\lambda = \omega/k$
Dalga boyu	λ	$\lambda = v/ f = v.T = 2\pi/k$
Dalga sayısı	k	$k= \omega/ v = 2\pi/ \lambda = 2\pi f/ v$



Şekil 2. Bir zaman tanım aralığında patlatma neticesinde oluşan tipik yer sarsıntısı (Dowding, 1985)

Figure 2. Typical blast vibration time history (Dowding, 1985)

YER TİTREŞİMLERİNİN ETKİLERİ (IMPACTS OF GROUND VIBRATIONS)

Bu başlık altında, insanların patlatma kaynaklı yer sarsıntılarına tepkileri ve yer sarsıntısının yapılar üzerinde oluşturduğu hasarlar anlatılmaktadır.

İnsanların patlatma kaynaklı yer sarsıntılarına tepkileri (Human reactions to blast-induced ground vibrations)

Zemin titreşimlerinin insanlar üzerindeki olumsuz etkileri (Adverse effects of ground vibrations on humans)

Zemin titreşimlerinin insanlar üzerindeki olumsuz etkileri psikolojik ve fizyolojik etki olarak ikiye ayrılmaktadır. Patlatma neticesinde oluşan yer sarsıntısının insanlar üzerinde psikolojik etkisinin değerlendirilmesi önemlidir. Ancak bu öznel bir konudur çünkü yer sarsıntısının psikolojik etkisi patlatma anında insanın konumu, etkinliği (ayakta, oturmada, uyanık, uykuda) ve hatta ruh haline bağlıdır. Yüksek titreşim algıları nedeniyle insanlar, herhangi bir zemin titreşiminin zarar verdiğini düşünürken, bu zemin titreşimlerinin çoğu hasar eşliğinin altındadır.

İnsan algısı, titreşimin frekansına ve şiddetine bağlıdır. İnsan vücudu, özellikle 1 ila 100 Hz arasındaki düşük frekans aralığında zemin titreşimlerine karşı son derece hassastır (Transport and Road Research Laboratory Department of Transport, 1986).

Literatürde zemin titreşimine bağlı olarak insan algısı ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Örneğin Çizelge 2.3’te kısa süreli zemin titreşimlerinin insanlar üzerindeki etkileri vurgulanmaktadır (Oriard & Emmert, 1980). Çizelge 4’te ise hem titreşimin frekansını hem de PPV’yi dikkate alarak patlatma sonucunda oluşan zemin titreşiminin insan üzerindeki tepkisini değerlendirmek için yeni bir kriter sunulmaktadır (Peng et al., 2017).

Çizelge 3. Kısa süreli zemin titreşimlerinin insanlar üzerindeki etkileri (Oriard & Emmert, 1980)*Table 3. Effects of transient ground vibrations on humans (Oriard & Emmert, 1980)*

İnsanlar üzerindeki etkileri		PPV seviyeleri (mm/s)
Fizyolojik hasar	Tehlike	101,6 - 254
	Risk	50,8 - 101,6
Şiddetli / tolerans eşiği		30,5 - 50,8
Rahatsızlık	Çok rahatsız edici	25,4 - 30,5
	Rahatsız edici	10,2 - 25,4
Fark edilebilir	Şiddetle algılanabilir	2,5 - 10,2
	Kesinlikle algılanabilir	1,5 - 2,5
	Ancak algılanabilir	0,25 - 1,5

Çizelge 4. Zemin titreşimlerinin insanlar üzerindeki etkileri (Peng et al., 2017)*Table 4. Effects of ground vibrations on humans (Peng et al., 2017)*

İnsanlar üzerindeki etkileri	PPV (mm/s)		
	< 10 Hz	10-50 Hz	> 50 Hz
Fizyolojik hasar	50,9 - 78	78 - 95,5	95,5 - 119,4
Şiddetli / tolerans eşiği	15,9 - 23,9	23,9 - 27,9	27,9 - 39,8
Rahatsızlık/ rahatsız edici	1,59 - 2,39	2,39 - 6,37	6,37 - 7,96
Fark edilebilir/ algılanabilir	0,03 - 0,08	0,08 - 0,11	0,11 - 0,16

Farklı çalışmalar tarafından geliştiren yer sarsıntılarında insan algısıyla ilgili kriterlere rağmen, bu konuya birçok parametre etki ettiği için karmaşık ve öznel bir konudur. Etkili bu parametreler, kişinin olay sırasında yapının içindeki veya dışındaki bulunduğu yeri (çünkü içerdeki insanlar zemin titreşimini dışarıdakilerden daha çok algılar), yaptığı aktiviteyi, kişiliğini, ruh halini ve yerel topluluğun patlatma projesine karşı sosyal tutumunu (çünkü bir proje bir topluluk tarafından memnuniyetle karşılanmadığında, patlatma faaliyetleri istenmez) (Society of Explosives Engineers, t.y.) kapsamaktadır. Ayrıca, zemin titreşiminin süresi ve zamanı (gündüz veya gece, çalışma saatleri içinde veya dışında), patlatmaların sıklığı, yerel topluluğun önceden bilgilendirilmesi, alandaki önceki patlatma işlemlerinin gerçekleşmesi ile kişilerin sağlık durumu, mizacı ve yaşı önemli bir rol oynamaktadır (Transport and Road Research Laboratory Department of Transport, 1986). ANSI S3.29-1983, ANSI tarafından geliştirilen bir standarttır. Bu standart 1 saniyeden daha kısa süren titreşimler için gündüz gerçekleştirilen patlatma olay sayısına, zamana (gece veya gündüz) ve lokasyona (konut, ofis) bağlı olarak binadaki insanlar tarafından tolere edilen PPV değerlerini belirtmektedir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Binalarda insanlar tarafından tolere edilen PPV değerleri (American National Standards Institute (ANSI), 1983)*Table 5. PPV values tolerated by humans in buildings (American National Standards Institute (ANSI), 1983)*

Günlük olay sayısı	1	12	26
Mesken, gece	0,2 mm/s	0,09 mm/s	0,07 mm/s
Mesken, gündüz	12,70 mm/s	6,35 mm/s	4,30 mm/s
Ofis ve iş yerleri	18 mm/s	8,90 mm/s	6,10 mm/s

İnsan algısı ile yapısal hasar arasındaki ilişki (Relationship between human perception and structural damage)

Çoğu uluslararası hasar kriterleri, PPV değerinin eşiğinin 5 ila 50 mm/s arasında olmasını belirtmektedir. Ancak, insanlar titreşimlere karşı son derece hassastır ve yapısal hasarlara neden olabilecek PPV değerlerinin çok altındaki seviyeleri algılayabilirler. PPV değeri olarak insandaki titreşim algısı 0,02 mm /s'den, fizyolojik hasar 50 mm/s'den ve yapısal hasar 5 mm/s'den başlamaktadır. İnsanlar,

herhangi bir titreşimin (en düşük seviyelerde olsa bile), yaralanmalara ve yapısal hasarlara yol açacağını varsaydıklarından, korku ve endişe yaşamaktadırlar. Sonuç olarak bu durum şikayetlere neden olmaktadır. Aslında, bir patlama sonucunda algılanan herhangi bir zemin titreşimi, sakinlerin yapılarında hasar korkusu ile çatlaklar aramasına ve çoğu zaman önceden var olan, ancak görmemiş ya da hatırlamadığı çatlaklar buldukça, patlatmayı suçlayıp şikayet etmelerine neden olmaktadır (Transport and Road Research Laboratory Department of Transport, 1986).

Yer Sarsıntısının Yapılar Üzerinde Oluşturduğu Hasarlar (Structural Damages Caused By Ground Vibrations)

Yer sarsıntılarının neden olduğu yapısal hasarlar 3 ana kategoriye ayrılmaktadır (Işık & Kuruşcu, 2018; Orca Nitro, t.y):

➤ **Küçük hasar:** Kozmetik veya eşik hasar olarak da bilinen küçük hasar, bölme duvarda, sıvada, boyada ve blok malzeme derzlerinde saç teli kalınlığında küçük (kılcal) çatlakların oluşumuna neden olmaktadır. Bu hasar türü sadece yapının görünümünü etkilemektedir.

➤ **Orta hasar:** Hafif hasar olarak da bilinen orta hasar, duvarlarda, kirişlerde geniş (10 mm) çatlakların oluşması ve tavan sıvalarının dökülmesine neden olmaktadır. Ancak bu hasar tipi yapı elemanlarının yük taşıma kabiliyetlerini etkilemez.

➤ **Büyük hasar:** Esaslı hasar olarak bilinen büyük hasar, kolon ve kirişlerde çok geniş (25 mm) çatlakların oluşmasına, bağlantıların gevşemesi, duvar ve bacalardan taş, tuğla düşmesi ve yapıda kalıcı deformasyonlar oluşturarak yapı elemanlarının bozulmasına neden olmaktadır. Bu hasar tipi binanın yük taşıma kabiliyetini etkilemektedir.

Aynı titreşim seviyesine maruz kalan binalar aynı şekilde etkilenmemektedir. Bir binanın titreşim seviyesine gösterdiği hasar tipini etkileyen birçok faktör vardır. Bu faktörler, bölgenin litolojisini, yapının yüksekliğini ve karakteristiklerini (kat sayısı), tabakalarının anizotropisini, binanın teknik özelliklerini, bölgenin fiziko-mekanik özelliklerini, titreşim kaynağının türünü, titreşimin sıklığını, patlatmanın süresini ve patlatma sırasında oluşan sismik dalgalar ile arazi ve yapılar arasındaki etkileşimlerini kapsamaktadır.

Patlatma Kaynaklı Sismik Dalgalar, Arazi Katmanları Ve Yapılar Arasındaki Etkileşimler (Interactions Between Blast-Induced Seismic Waves, Ground Layers And Structures)

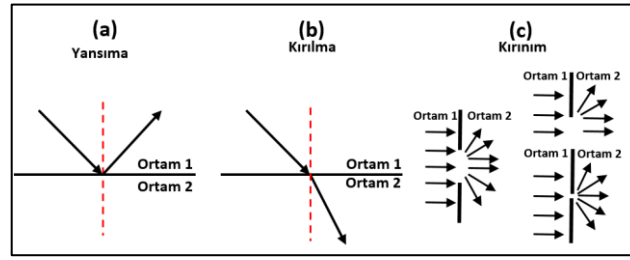
Arazi katmanları, titreşim dalgaları ve yapılar arasındaki etkileşimler şunlardır:

➤ **Doğrudan/direkt etkileşim:** Yer sarsıntısının şiddeti ve frekansı hasar eşliğinin üzerindeyse hasar meydana gelmektedir.

➤ **Yansıma (Reflection):** Yansıma 2 farklı katman arasındaki sınırdaki meydana gelir ve sınırdaki sismik dalganın birinci ortama kısmen veya tamamen sıçramasına (*bouncing*) neden olmaktadır (Şekil 3a).

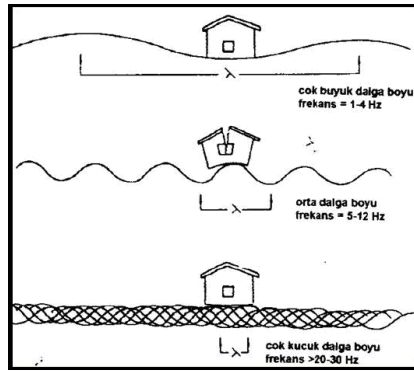
➤ **Kırılma (Refraction):** Bu durum 2 ortam arasındaki sınırdaki meydana gelir ve birinci ortamdan ikinci ortama geçerken hız değişiminin neden olduğu bir dalganın eğilmesine neden olmaktadır (Şekil 3b).

➤ **Kırınım ya da difraksiyon (diffraction):** Ortamda bir objenin (bariyer veya küçük açıklık) varlığı, sismik dalgaların kırınımına neden olmaktadır (Şekil 3c).



Şekil 3. Yansıma kırılma ve kırınım fenomenleri
Figure 3. Reflection, refraction and diffraction phenomena

➤ **Rezonans etkisi:** Zemin titreşim dalgalarının frekansları ve yapının doğal (özyapısal) frekansları ile örtüşmesi daha büyük bir titreşime neden olabilmektedir. Buna rezonans etkisi (*Resonance effect*) denir. Rezonans etkisi patlatmadan kaynaklanan yer sarsıntılarının frekans değerleri yapının özyapısal frekans değerlerine yakın olduğunda (genellikle 5-12 Hz aralığında) meydana gelmektedir (Şekil 4).



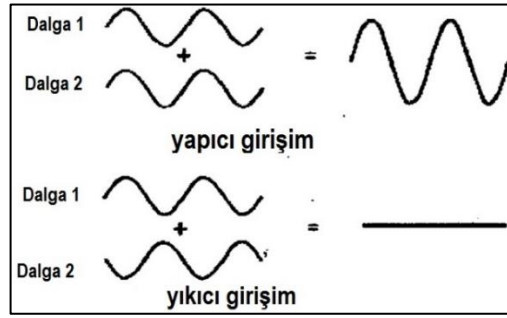
Şekil 4. Farklı frekanslı dalgaların binalar üzerindeki etkileri (Alpaydın et al., 2004)
Figure 4. Effect of waves of different frequencies on buildings (Alpaydın et al., 2004)

Patlatma sonucunda oluşan zemin titreşim dalgalarının rezonansa neden olma riski yüksektir, çünkü:

- Genel olarak, bu zemin titreşimleri düşük frekanslar (40 Hz'in altında) sergilemektedir.
- Sismik dalgalar yayılırken yüksek frekanslarını kaybeder.
- Düşük frekanslı dalgalar daha uzun mesafelere ilerler, bu nedenle daha fazla yapıları etkilemektedir.

➤ **Yorulma hasarı (Fatigue):** Rezonans etkileri uzun bir süre boyunca tekrarlanınca yapının bozulmasına yol açabilmektedir. Buna yorulma hasarı denir.

➤ **Girişim (Interference):** Girişim, aynı ortamda aynı anda hareket eden benzer frekansa sahip 2 veya daha fazla dalgaının örtüşmesinin sonucudur. Böylece yeni bir dalga oluşturmaktadır. Girişimler daha büyük bir yer sarsıntısı oluşturan yapıcı girişimler (*Constructive interferences*) veya daha küçük yer sarsıntısı oluşturan yıkıcı girişimler (*Destructive interferences*) olarak ikiye ayrılmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Yapıcı ve yıkıcı girişimler

Figure 5. Constructive and destructive Interferences

➤ **Sönümlenme etkisi** (*the damping effect*): Birçok faktör, yer sarsıntısının sönümlenmesini etkilemektedir. Örneğin, kayalar ve yapılar gibi sert malzemeler yüksek oranda aktarıcıdır, yani sönümlenme etkileri yumuşak zeminlere kıyasla daha düşüktür. Yumuşak zeminlerde sönümlenme etkisi litoloji, kohezyon ve nem seviyesi gibi faktörlere bağlıdır. Örneğin, kumların sönümlenme etkileri killerden daha yüksektir. Mesafe gittikçe, yüzey dalgaları cisim dalgalarına nazaran daha az sönümlenir. Yüzey dalgalarının genliği uzaklığa bağlı olarak $1/\sqrt{r}$ (r kaynak alıcı uzaklık) ile azalır. Oysa cisim dalgaları için genlikteki azalış ise $1/r$ 'dir (Kaypak, 2019).

PATLATMADAN KAYNAKLANAN YER SARSINTISI HASARININ DEĞERLENDİRME PARAMETRELERİ (ASSESSMENT PARAMETERS OF THE DAMAGES CAUSED BY BLAST-INDUCED GROUND VIBRATION)

Madencilik faaliyetlerinde patlatma neticesinde oluşan yer sarsıntısının neden olduğu etkileri ve hasarları değerlendirmek için iki ana parametre kullanılmaktadır:

- Bir kinematik tanımlayıcı: Titreşim şiddetini belirlemek için birkaç kinematik tanımlayıcı vardır:
 - Parçacık hızı: Maksimum Parçacık hızı (PPV) veya Bileşke Vektörel Toplamı (PVS),
 - Parçacık yer değiştirmesi-deplasman (s)
 - Parçacık ivmesi (a)
- Frekans (f)

Bu parametrelerin aralığı Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 6. Patlatma parametrelerinin değer aralığı (Nicholson, 2005)

Table 6. The value ranges of blasting parameters (Nicholson, 2005)

Parametre	Değer Aralığı
Parçacık yer değiştirmesi (deplasman)	0,0001 – 10 mm
Parçacık hızı	0,001 – 1000 mm/s
Parçacık ivmesi	10 – 100000 mm/s ²
Kayıt süresi	0,5 – 3 s
Dalga boyu	30 – 1500 m
Frekans	0,5 – 200 Hz

Kinematik Tanımlayıcılar (Kinematic Descriptors)

Titreşim şiddetlerini tanımlamak için parçacık hızı (Maksimum Parçacık Hızı PPV veya Bileşke Vektörel Toplamı PVS), yer değiştirmesi-deplasman (s) veya parçacık ivmesi (a) kullanılır. Bu parametreler bir sismograf tarafından otomatik olarak belirlenebilmektedir.

Parçacık hızı: PPV ve PVS (Particle velocity: PPV and PVS)

Parçacık hızı, titreşim nedeniyle ortamdaki bir taneciğin birim zamandaki yer değiştirmesini (deplasman) temsil eder ve mm/s cinsinden ifade edilir. Parçacık hızını belirlemek için Maksimum Parçacık Hızı PPV (*Peak Particle Velocity*) veya Bileşke Vektörel Toplamı PVS (*Peak Vector Sum*) kullanılmaktadır.

Maksimum Parçacık hızı (PPV), bir patlatma sonucunda oluşan parçacık titreşiminin (enine, düşey ve boyuna) üç bileşenini simultane olarak ölçerek ve maksimum değeri alınarak belirlenir. Ancak, Bileşke Vektörel Toplamı (PVS) enine, düşey ve boyuna düzlemler boyunca oluşan maksimum parçacık hızlarının karelerinin toplamının kareköküdür ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$PVS = \sqrt{T_p^2 + V_p^2 + L_p^2} \quad (2.4)$$

Burada; T_p , V_p ve L_p sırasıyla enine, düşey ve boyuna düzlemler boyunca maksimum parçacık hızıdır.

Her ikisi de parçacık hızını temsil etse de, PPV ve PVS oldukça farklıdır. PPV vektörel bir büyüklük, yani bir değere ve bir yöne sahiptir. Ancak, PVS skaler bir büyüklüktür çünkü sadece bir değere sahiptir. Ayrıca, aynı patlatma projesi için, zemin titreşim hasarları değerlendirilirken PVS değerleri PPV değerlerinden genellikle daha büyüktür. Bu nedenle bazı çalışmalar, (Torres et al., 2018) titreşim hasarlarının incelemesinde PVS'nin daha güvenli bir parametre olduğunu savunmaktadır. Aynı zamanda PVS, PPV tarafından göz ardı edilen diğer iki bileşenin etkilerini dikkate almaktadır. Ancak, bazı araştırmacılar titreşim hasarlarını değerlendirmek için PPV'yi en iyi gösterge olarak tanımlar çünkü parçacık ivmesi ve deplasman gibi yer hareket parametreleri ile iyi bir korelasyon göstermektedir.

Parçacık yer değiştirmesi-deplasman (Particle displacement)

Parçacık yer değiştirmesi (*particle displacement s*), zemin titreşimine maruz kalan bir parçacığın başlangıç noktasına (referans konumu) olan mesafesidir (Çağlar, 2008). Bu parametre (s) olarak tanımlanır ve (mm) cinsinden ifade edilir. Parçacık deplasmanı, hızın zaman ile çarpılmasıyla elde edilir.

Parçacık İvmesi (Particle acceleration)

Parçacık ivmesi (*acceleration, a*) birim zamanda parçacığın hız değişim oranını belirtmektedir ve (mm/s^2) veya (g) cinsinden ifade edilir. Bu parametre, hızdaki farkı zamandaki farka bölerek sismograf tarafından hesaplanabilir. Aynı zamanda parçacık ivmesi maksimum parçacık hızı (PPV) ve frekans (f) kullanılarak aşağıdaki belirtilen denklemle de hesaplanabilmektedir:

$$a = 2 \pi v f \quad (2.5)$$

a: parçacık ivmesi (mm.s^{-2}), v: PPV (mm.s^{-1}) ve f: frekans (Hz) (Avellan, Belopotocanova, & Puurunen, 2017)

Ancak hesaplanan değerler, genellikle titreşim dalgası mükemmel bir sinüzoidal dalga olmadığı için ölçülenlerden daha düşüktür. Bazı referanslar, potansiyel olarak hasara neden olabilecek parçacık ivmesinin değerini $0,159g$ (g yerçekimi ivmesidir, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$) olarak belirtmektedir.

Frekans (Frequency)

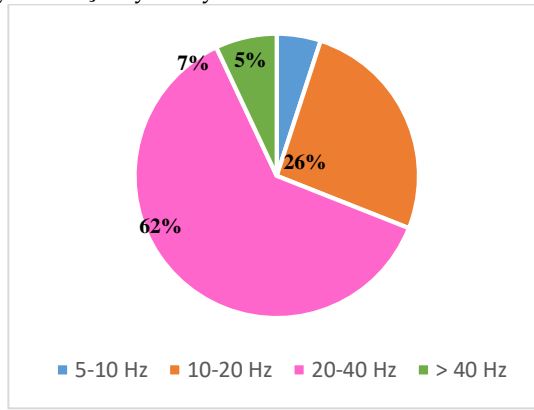
Frekans, bir saniyedeki titreşim dalga sayısı olarak tanımlanmaktadır ve (Hz) cinsinden ifade edilir. Patlatma neticesinde oluşan yer sarsıntılarının yapısal hasarlarını ve potansiyel şikayetleri önlemek için, oluşan frekansların dağılımını incelemek en önemli unsurlardan biridir.

Patlatma faaliyetlerinden oluşan zemin titreşim frekanslarının çoğu 40 Hz'in altındadır. Şekil 6' da iki farklı açık ocakta patlatmalar neticesinde yayılan zemin titreşim frekanslarının dağılımı sunulmaktadır.

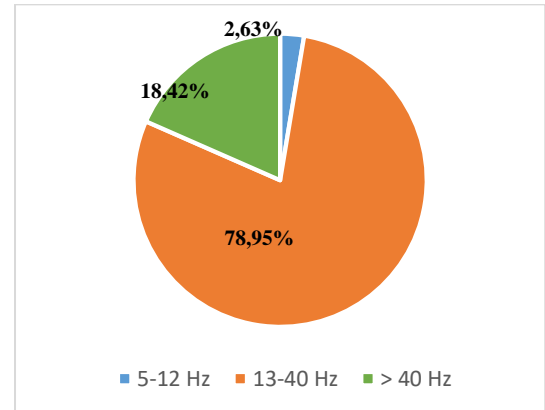
Birleşik devletler maden bürosu (USBM), frekansları düşük ve yüksek frekanslar olarak sınıflandırır ve düşük frekansları (<40Hz) daha zarar verici olarak tanımlamaktadır. Düşük frekanslar, yüksek frekanslardan daha az sönümlenme etkisine maruz kaldıklarından dolayı daha ileri mesafelere gidebilmektedirler (Siskind, Stagg, Kopp, & Dowding, 1980). Ayrıca, 10 Hz değerinin altındaki frekanslar

hasar olasılığını artırmaktadır (Siskind et al., 1980). Patlatmalar sonucunda oluşan yer sarsıntısının düşük frekansları, bir veya iki katlı binalarda genellikle 5-10 Hz arasında değişen bina özyapısal frekanslarıyla (Erçikdi et al., 2004) etkileşime girebilir ve eğer bu frekanslar binanın özyapısal frekanslarına eşit veya biraz daha yüksek ise rezonans etkisine sebep olmaktadır. Böylece hasar eşik değerine ulaşıldığında yapısal hasarlara, eşik değere ulaşılmazsa bile insan rahatsızlığına neden olabilirler.

İnsanlar düşük frekansları kolayca algılayabilir ancak yüksek frekansları neredeyse hiç algılayamaz. Bu düşük frekanslar (<40Hz) zarar verici etkilere sahip olmasına rağmen, insanlar tarafından kolay algılandığı için yapılara sürekli zarar verdiği izlenimi oluşur. Bu nedenle patlatma neticesinde oluşan hasarlar analiz edildiğinde, uluslararası standartların belirlediği hasar verme eşik seviyelerinden az olsa bile yüksek şikayet sayısına neden olabilmektedir.



(a) Açık ocak (Siskind et al., 1980)



(b) Araklı-Taşönü kireçtaşı ocağı (Erçikdi et al., 2004)

Şekil 6. Farklı iki açık ocakta patlatma sonucunda oluşan yer sarsıntısının frekans dağılımı
Figure 6. The frequency distribution of blast-induced ground vibrations in two different open pit quarries

YER SARSINTISININ ÖLÇÜMÜ VE İZLEME SİSTEMİ (MEASURING AND MONITORING SYSTEM OF GROUND VIBRATION)

İlk zemin titreşim ölçüm cihazlarının ortaya çıkışı 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. Patlatma sonucunda oluşan yer sarsıntısının ilk ölçümleri 1919'da Rockwell tarafından yapılmıştır (Taqieddin, 1986). Bu ölçümlerin sonuçları Rockwell tarafından 1927'de bildirilmiştir. Ardından çeşitli cihazlar gelişmeye devam etmiştir.

Günümüzde hem jeofon ve mikrofon hem de izleme sistemleri ve yazılımları kullanarak hava şoku ve zemin titreşimi ölçmeyi ve kontrol etmeyi sağlayan gelişmiş sismograflar mevcuttur (Şekil 7).

Zemin titreşimleri kapsamında, sismograflar her bir patlatma olayı için zaman esaslı olarak parçacık hızı bileşenlerini (enine, düşey ve boyuna), frekans, maksimum parçacık hızı (*Peak Particle Velocity PPV*), bileşke Vektörel Toplamı (*Peak Vector Sum PVS*), maksimum deplasman ve maksimum parçacık ivmesini kaydetmektedir. Ölçümlerin hassas ve güvenilir bir şekilde yapılabilmesi için cihaza bağlanan jeofon ve mikrofon her türlü zeminde hareket etmeden (sabit) kalacak şekilde kurulmaktadır (Yılmaz, 2017).



Şekil 7. Instantel Minimate Plus (Instantel)

Figure 7. Instantel Minimate Plus (Instantel)

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İnsan yapımı titreşim kaynakları incelendiğinde çeşitli alanlarda ve özellikle madencilik faaliyetlerinde yoğun olarak kullanılan patlayıcı maddeler ana endişe kaynağıdır. Patlatma işlemleri, en tehlikeli zemin titreşim kaynağıdır ve dolayısıyla insan rahatsızlıkları ile esaslı hasarların ardındaki sayısız şikâyetlerin ana sebebi olarak öne çıkmaktadır. Böylece, kişisel ve yapısal etkileri önlemek için patlatma sonucunda oluşan yer sarsıntısının değerlendirilmesi, şev stabilitesi, gaz ve petrol boru hatlarının güvenliği, anıtlar ve tarihi binalar, barajlar, köprüler, nükleer yapılar ve yeraltı depoları gibi birçok tasarımın korunmasında önemlidir. Bunun sebebi, yer sarsıntılarının, patlatmadan kaynaklanan diğer etkilere nazaran çok daha uzak mesafelere ulaşabilmesi, yani daha büyük bir bölgeyi etkilemesidir. Ayrıca patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının, deprem dalgaları ile benzer hareket etmeleri yapılar üzerindeki hasar etkilerini arttırmaktadır.

Yer sarsıntısı insan rahatsızlığına, hassas ekipmanların arızalanmasına, yapısal hasarlara ve hatta can kayıplarına neden olabilmektedir. Bu sebeple, madencilik ve inşaat kazılarının temelini oluşturan patlatma faaliyetleri sonucu ortaya çıkan zemin titreşimlerinin takip ve kontrol edilmesi özel irdelenmesi gereken konular arasındadır. Bu yüzden, yer sarsıntılarının zararlı etkilerini en aza indirmek, insan rahatsızlığı ve yapısal hasarları önlemek için patlatma sırasında oluşan sismik dalgaların yayılım mekanizmalarının araştırılması son derece önemlidir. Ayrıca insanlar, evlerinin patlatma kaynaklı yer sarsıntılarından dolayı hasar gördüğünü iddia etmekte ve bunu dava konusu yaparak işletmelerden tazminat talebinde bulunmaktadır. Bu iddiaların yersiz olduğu, çeşitli nedenlerden (zemin oturması, yaşlanma, heyelan) dolayı oluşan hasarların patlatma faaliyetlerine atıf edildiği sık karşılaşılan bir durumdur. Bu nedenle patlatma kaynaklı yer sarsıntılarının takip ve kontrol edilmesi ve hasar analizlerinin uzman kişilerce değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aksoy, C.O., Yalçın, E., 1999, Kırmataş Üretim yöntemlerinin Ekonomik Analizi, 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir Türkiye
- Alpaydın, E., Alparsar, M., Elmacı, E., Halıcılar, G., İnal, H. S., İşcen, H. İ., Patır, O., ve Özkazanç, M.Ö., 2004, Patlayıcı maddeler ve patlatma teknikleri, *Nitromak*, Ankara, s. 129.
- American National Standards Institute, 1983, Guide to the Evaluation of Human Exposure to Vibrations in Buildings, ANSI S3.29-1983, p.10.
- Avellan, K., Belopotocanova, E., & Puurunen, M., 2017, Measuring, monitoring and prediction of vibration effects in rock masses in near-structure blasting, *Procedia Engineering*, 191, 504-511.

- Bilim, N., Kekeç, B., 2017, Patlatma Kaynaklı Çevresel Etkiler ve Önlenmesi İçin Alınması Gereken Tedbirler, International Symposium on Mining and Environment (ISME 2017), 27-29 Sept. 2017, Bodrum-Turkey
- Bormann, P., 2012, New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2), *GFZ German Research Centre for Geosciences*, Potsdam, 33-103.
- Cevzici, H., 2013, New Approach On Blasting For Excavation, *SDU International Technologic Science*, Vol. 5, No 1, pp. 104-111
- Çağlar, S., 2008, Orman yolları yapımında kaya patlatma tekniği ve çevresel etkileri üzerine bir araştırma, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 29-34.
- Dowding, C. H., 1985, Blast vibration monitoring and control, *Prentice Hall, Inc*, Englewood Cliffs, NJ, p. 297.
- Duarte, M. L. M., Misael, M. R., & Filho, L. E. F., 2002, Experimental evaluation of vibration comfort for a residential environment, *Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering* 4753, 1376-1381.
- Elevli, B., & Arpaz, E., 2010, Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration (BIGV) by using relation diagram method (RDM), *Acta Montanistica Slovaca Ročník*, 15 (4), 261-268.
- Erçikdi, R., Kesimal, A., Yılmaz, E., & Cihangir, F., 2004, Patlatma kaynaklı yersarsıntısı ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7, 195-215.
- Ghiloufi, D., 2020, Farklı Zeminlerin Yer Titreşim Dalgalarının Yayılım Mekanizması Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Konya, s. 111
- International Organisation for Standardisation, 2010, Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures -guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures, ISO 4866, Geneva, Switzerland.
- Işık, M. E., & Kuruşcu, A. O., 2018, Yapısal titreşimlerin kullanıcı konforuna etkisinin incelenmesi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 01, 20-34.
- Kaypak, B., 2019, Sisimik dalgalar (Yüzey dalgaları) [online], Ankara Üniversitesi, <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=95608> [Ziyaret Tarihi: 25 Şubat 2019]
- Moğulkoç, Y., Çıldıroğlu, H.A., 2017, Fizik Laboratuvar Ders Notları, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ankara, s.65
- Nicholson, R. F., 2005, Determination of Blast Vibrations Using Peak Particle Velocity at Bengal Quarry, in St Ann, Jamaica, Master's Thesis, *Luleå University of Technology*, 33-41.
- Oriard, L. L., & Emmert, M. W., 1980, Short-delay Blasting at Anaconda's Berkeley Open-pit Mine, *AIME Annual Meeting*, Las Vegas, NV, 60-80.
- Orica Nitro., t.y., Case Study Selection of Blasting Limits for Quarries and Civil Construction Projects, *ORICA-NITRO*, p. 14.
- Peng, Y., Wenbo, L., Jing, Z., Yujun, Z., & Ming, C., 2017, Evaluation of human response to blasting vibration from excavation of a large scale rock slope: A case study, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16 (2), 435-446.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H., 1980, Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, *U.S. Bureau of Mines*, p. 84
- Society of Explosive Engineers, t.y., Human perception [online], <https://explosives.org/vibration-basics/human-perception/> [Ziyaret Tarihi: 05 Ağustos 2019]
- Srbulov, M., 2008, Geotechnical earthquake engineering: Simplified analyses with case studies and examples, *Springer Science & Business Media*, Berlin, p. 244.
- Singh, N.T., 2012, New Trends in Economical and Safe Rock Blasting, *J Powder Metall Min. V. 1:1*, <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9806.1000e104>
- Taqieddin, S. A., 1986, Ground vibration levels: Prediction and parameters, *Mining Science and Technology*, 3, 111-115.

- Torres V.F., N., Silveira, L. G. C., Lopes, P. F. T., & M. de Lima, H., 2018, Assessing and controlling of bench blasting-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring community, *Journal of Cleaner Production*, 187, 514-524.
- Transport and Road Research Laboratory, 1986, Ground vibration caused by civil engineering works, *Department of Transport, Research report 53, Crowthorne, Berkshire*, p. 19.
- Wu, X., & Wu, R. S., 2008, Handbook of Signal Processing in Acoustics, *Springer*, New York, NY, 1535-1544.
- Yılmaz, T., 2017, Maden İşletme laboratuvarı -2 deney adı: Delme - Patlatma ve çevresel etkileri [online], Konya Teknik Üniversitesi, http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/maden_9137e.pdf



ELEKTRİK MOTORLARINDA UYGULANAN BAKIM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ, KARŞILAŞTIRILMASI VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ETKİSİ

¹Abdulsamed TABAK , ²Mehmet ÖZKAYMAK 

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği
Bölümü, Konya, TÜRKİYE

²Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE
¹atabak@erbakan.edu.tr , ²mozkaymak@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 10.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 17.08.2020)

ÖZ: Sanayi devriminden günümüze kadar geline süreçte tüketici talepleri sürekli artmış ve bu talebi karşılamak adına üreticiler yeni arayışlar içerisine girmiştir. Buna bağlı olarak üretimdeki devamlılığın sağlanması için ekipmanlara daha fazla değer verilmiş, ekipmanlardaki arıza ve duruş istenmez hale gelmiş ve bakım yöntemlerine duyulan ilgi artmıştır. Özellikle endüstride üretimin kalbi niteliğindeki elektrik motorlarında uygulanan bakım yöntemleri ilk zamanlardan beri sürekli geliştirilmiş ve en uygun bakım yöntemi her zaman aranmıştır. Çalışmamızda sanayideki elektrik motorları üzerinde yapılan bakımlar ilkelden gelişmişe doğru sınıflandırılmış ve irdelenmiştir. Bu bakım yöntemleri hem maddi açıdan hem de birtakım avantaj/dezavantajları açısından birbirleri ile karşılaştırılarak uygulamada teknik personel için en uygun bakım yönteminin seçimi hakkında bilgi verilmiştir. Ardından, durum bazlı bakım olarak da bilinen kestirimci bakım yönteminin en yaygın kullanılan teknikleri irdelenmiştir. Bunların yanında internet ve uzaktan erişim sistemlerinin kestirimci bakıma olan katkısı incelenmiş ve bakımın önemi her açıdan ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrik motorlarında bakım, Kestirimci bakım, Bakım yöntemlerinin karşılaştırılması, Uzaktan erişim

The Investigation and Comparison of Maintenance Methods Applied In Electric Motors and The Effect Of Remote Access To Predictive Maintenance

ABSTRACT: In the period from the industrial revolution to the present day, consumer demands have continuously increased and manufacturers have been in search of new products to meet this demand. Therefore, more value was given to equipment to ensure continuity in production, fault and downtime in equipment became undesirable, and interest in maintenance methods increased. Especially in the industry, the maintenance methods applied in electric motors, which are the heart of production, have been continuously improved since the early days and the most appropriate maintenance method has always been sought. In our study, the maintenance performed on the electric motors in the industry was classified from primitive to advanced and examined. These maintenance methods were compared with each other both financially and in terms of a number of advantages/disadvantages, and information was given about the selection of the most appropriate maintenance method for technical personnel in practice. The most commonly used techniques of the predictive maintenance method, also known as condition-based maintenance, were discussed. In addition, the contribution of internet and remote access systems to predictive maintenance were examined and the importance of maintenance were demonstrated in every respect.

Key Words: Maintenance of electric motors, Predictive maintenance, Comparison of maintenance methods, Remote access

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik motorları endüstriyel tesislerin vazgeçilmez ekipmanlarıdır. TÜİK'in 2018 verilerine göre Türkiye'de elektrik enerjisinin %45.6'sı sanayide tüketilmektedir. Bunun yanında binalarda ve yapılarda tüketilen elektriğin yaklaşık %36'sı, sanayide tüketilen elektriğin ise yaklaşık %70'i elektrik motorları tarafından tüketilmektedir. Sektörel bazda değerlendirildiğinde ise bazı sektörlerdeki elektrik motorlarının elektrik tüketimindeki oranı %80'leri bulmaktadır (Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı,.) (TÜİK, 2019) (Verimlilik Genel Müdürlüğü, 2015).

Dünya üzerinde çalışır durumdaki elektrik motorlarının sayısı bize günlük yaşantımızın hemen her noktasında bir elektrik motoru kullanıcısı olduğumuzu gösterir niteliktedir. Dünyada yaklaşık 2.23 milyar adet elektrik motoru vardır. Bu motorlar güçlerine göre kategorize edildiğinde; 750 W'a kadar olan motorlar küçük, 0.75-375 kW arasındaki motorlar orta, 375 kW üzerindeki motorlar büyük elektrik motorları olarak sayılmaktadır. Küçük güçteki elektrik motorlarının sayısı 2 milyara yakındır. Bunun yanında orta büyüklükteki motorların sayısı yaklaşık 230 milyon ve harcadığı enerji, elektrik motorlarında harcanan enerjinin %68'ini oluşturmaktadır. Yaklaşık 600 bin adet olan büyük elektrik motorlarının da elektrik tüketimi %23 seviyelerindedir (Waide & Brunner, 2011).

Üç fazlı alternatif akım asenkron motorlar sanayideki elektrik motorlarının yaklaşık %90'ını oluşturmaktadır (Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı,.). Sanayide asenkron motorların bu kadar çok tercih edilmesinin nedenleri arasında ilk alım ve bakım maliyetlerinin düşük olması, bakımlarının az ve kolay olması, yapılarının dayanıklı olması, çalışma esnasında ark yapmaması, devir sayısı ayarının kolay yapılabilir olması ve yük altındayken devir sayılarının çok değişmemesi sayılabilir (TERZİOĞLU & SELEK, 2017) (Mergen & Zorlu, 2009).

Günlük yaşantıda ister evsel kullanım olsun ister sanayi ya da ticarethaneler olsun elektrik motorlarında meydana gelen arıza ve aksaklıklar hayat kalitesini ve üretimi negatif yönde etkilemektedir (Tabak, 2020). Mesela endüstriyel tesislerde elektrik motorlarının durması, tahrik ettiği ekipmanın çalışamaz hale gelmesine sebep olur ki, bu da üretim prosesinin durması anlamına gelir. Dünya üzerinde endüstriyel tesislerde arızalara bağlı olarak yaşanan plansız duruşların maliyeti 2 trilyon ABD dolarının üzerindedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bu maliyet 700 milyar ABD dolarının üzerinde olduğu tahmin edilmektedir (Tabak, 2014).

Beklenmedik duruşların azaltılması sonucunda üretim verimliliklerinde yıllık %5-10'luk artış sağlanacağı düşünülmektedir. Çizelge 1'de farklı sektörler için plansız duruşların işletmeye bir saatlik maliyetleri verilmiştir (Tabak, 2014).

Çizelge 1. Farklı sektörlerdeki tesislerin saatlik duruş maliyetleri.

Table 1. Hourly downtime costs of facilities in different sectors.

600MW'lık bir Enerji Santralinde	> 40.000 USD.
Otomotiv Sektörü Boyahanede	> 100.000 USD
Çimento Sektöründe	> 500.000 USD
Petrokimya – Rafineri	>1.000.000 USD

Tesislerin saatlik duruş maliyetlerinin bu kadar yüksek olması, elektrik motorları ve tahrik ettiği ekipmanlar üzerindeki bakımın ne kadar gerekli olduğunu gözler önüne sermektedir.

Bizim çalışmamızda öncelikle elektrik motorları ve tahrik ettiği ekipmanlar üzerinde uygulanan bakım stratejileri ilkelden gelişmişe doğru sınıflandırılarak incelenmiş ve bu stratejiler birtakım avantaj/dezavantaj açılarından birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Uygulamada bu bakım stratejilerinin seçimi hakkında bilgi verilmiştir. Ardından kestirimci bakımın yaygın olarak kullanılan metotları incelenmiş, bu yöntemlerin çoğunlukla uygulandığı yerler ifade edilmiş ve uzaktan erişimin kestirimci bakıma olan katkısı anlatılmıştır.

EKİPMAN BAKIMININ KISA TARİHİ (BRIEF HISTORY OF EQUIPMENT MAINTENANCE)

Sanayi devrimiyle birlikte yaygınlaşan üretim tesislerinde, patronların düşündüğü tek şey üretim yapıp para kazanmaktı. Fabrikalarda çalışanlar arasında “işletmeci” ya da “bakımcı” gibi bir ayrım yoktu. İşçiler sadece makinenin nasıl çalıştığını öğrenip işbaşı yapıyordu ve eğer arıza çıkarsa fabrikanın sahibi ya da o dönemde sadece büyük fabrikalarda istihdam edilen ve makinelerden anlayan teknik personel çağırılırdı (Thomas, 2007).

Bakıma gereken önemin verilmemesi durumu II. Dünya Savaşı'na kadar devam etti. Çünkü henüz makinenin plansız duruşlarından kaynaklanan üretim kaybı önemli değil, rekabet ortamı çok kızışmamış, ürün taleplerine yetişememe durumu yok ve kritik ekipman tabiri oluşmamıştı (Brown & Sondalini, 2015).

Ancak II. Dünya Savaşı'nın ardından başta savaştan yenik çıkan Almanya ve Japonya olmak üzere savaşa katılan tüm ülkeler arasında yeni bir rekabet ortamı başlamış ve ülkeler teknoloji üretme yarışına girmişlerdir. Bu zamandan itibaren artık patronlar üretim esnasında gerçekleşecek herhangi bir aksaklığa karşı tolerans gösteremez hale gelmişler ve “bozulana kadar çalıştırın” şeklinde tarif edilen reaktif bakım yönteminden belirli bir plana dayalı önleyici bakım yöntemine geçiş yapmışlardır (Brown & Sondalini, 2015).

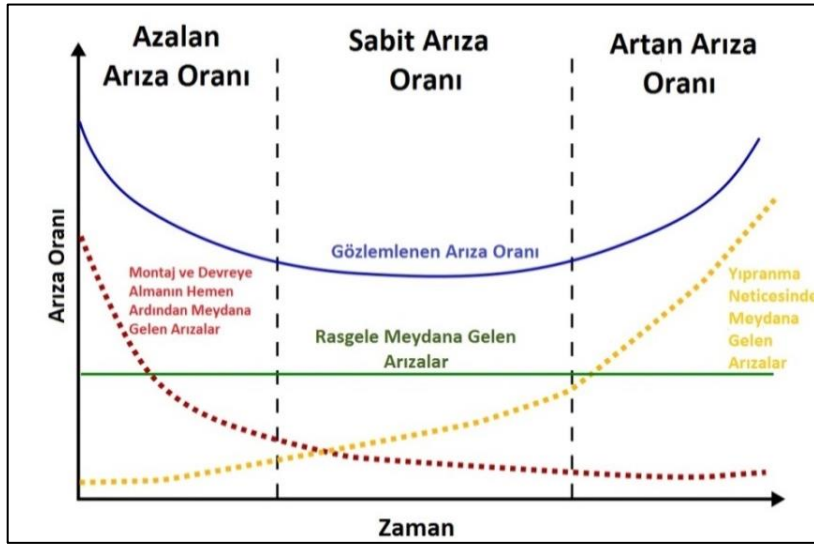
Teknoloji hızla ilerlemeye devam ederken yüksek kalite ve güvenilirlik gereksiniminin artışı ekipmanların daha karmaşık hale gelmesine neden olmuştur. Bu da önleyici bakım maliyetlerinde artışa neden olmuştur. Önleyici bakım yöntemleri endüstri kuruluşları için önemli bir gider haline gelmeye başlamasından dolayı daha sonraları kestirimci bakım olarak da adlandırılacak olan “durum bazlı bakım” (condition based maintenance (CBM)) yaklaşımı gibi daha verimli bakım yöntemleri ele alınmaya başlanmıştır (Martin, 1994). Bu nedenle teknolojinin gelişmesi ile birlikte kestirimci bakım yöntemleri artırılmış ve daha fazla ekipman arızası tespit edilmeye başlanmıştır.

Günümüzde ise birden fazla bakım stratejisini içeren bakım metodolojileri kullanılmaya başlanmıştır.

ELEKTRİK MOTORLARINDA BAKIM YÖNTEMLERİ (MAINTENANCE METHODS IN ELECTRIC MOTORS)

En basit ifadesiyle bakım; ekipmanın en az tasarım ömrü kadar süre içerisinde arıza çıkarmadan verimli bir şekilde çalışması şeklinde açıklanabilir. Dikkat edilirse, bu ifadede motorun tasarım ömrü içerisinde oluşabilecek arızaların önüne geçilmesi vurgulanmıştır. Şekil 1'de elektrik motorlarında meydana gelen arıza karakteristiği grafiği verilmiştir (Wyrwas, Condra, & Hava, 2011). Şekilden de görüldüğü gibi elektrik motorlarında temel olarak üç farklı arıza karakteristiği bulunmaktadır.

“Montaj ve devreye almanın hemen ardından meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan ve kırmızı renkle gösterilen birinci grafik eğrisi, ekipmanın ilk devreye alınmasının hemen ardından ortaya çıkması muhtemel arıza ihtimalini göstermektedir. Ekipmanlardaki bu arızaların temel nedenleri arasında; ekipmanın kötü dizayn edilmesi, montaj hatası/eksiği, birlikte çalışacağı diğer bileşenlerle uyumsuzluğu, kurulum ekibinin yeteri kadar bilgi ve tecrübeye sahip olmaması gibi nedenler sayılabilir. Bu arıza ihtimali başlarda çok yüksek olmasına rağmen zaman geçtikçe azalır (Klutke, Kiessler, & Wortman, 2003).



Şekil 1. Elektrik motorlarında meydana gelen arıza karakteristiği

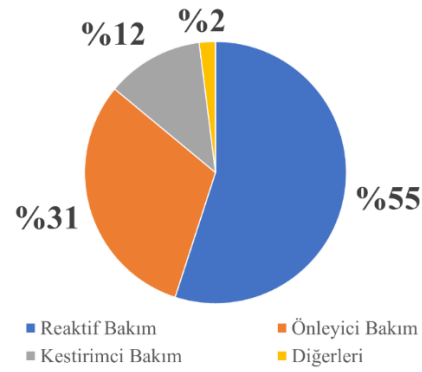
Figure 1. Fault characteristic of electric motors.

“Rastgele meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan ve yeşil renk ile gösterilen çizgi sabit bir değer ile ifade edilmektedir. Ekipmanın her an çıkarması muhtemel arızaları temsil ettiği için ekipmandan ekipmana değer olarak farklılık gösterse de her zaman sabit kalmaktadır. Bu arızaların meydana gelmesinin birçok nedeni olabilir; fakat arıza oluşmasının en büyük nedenleri arasında zayıf işletme ve bakım faaliyetleri sayılabilir. “Yıpranma neticesinde meydana gelen arızalar” olarak adlandırılan arızalar ise ekipmanın çalışma süresi uzadıkça artan oranda karşılaşılan arızalardır. Ekipmanların kullanım ömürleri azaldıkça bu arızalar artar. Grafikteki 3 farklı arıza eğrisi birleştirildiğinde ortaya “U” eğrisi şeklinde yeni bir grafik çıkar ve bu grafiğe “gözlemlenen arıza oranı” denir. Gözlemlenen arıza oranı bir ekipmanın zamana karşı arızalanma ihtimalini göstermektedir ve azalan arıza oranı, sabit arıza oranı ile artan arıza oranı şeklinde üç kısımdan oluşmaktadır.

Grafiğe bakıldığında arızaların genellikle ekipmanların ilk kurulumunun ya da bakımının ardından ve ekipmanın kullanım süresi uzadıkça ortaya çıktığı görülmektedir. Devreye alma ve bakım sonrası arızalar atlatıldıktan sonra belirli bir süre arıza ihtimali düşüktür. Ekipmanın yıpranması ve metal yorgunluğu sebebiyle ilerleyen süreçte ekipmanın arızalanma ihtimali yeniden yükselir. Düşük olan sabit haldeki arıza çıkarma oranının süresi çeşitli bakım yöntemleriyle ne kadar uzatılırsa ekipman o kadar uzun süre ve yüksek verimlilikte çalışır. Diğer bir deyişle ekipmanlardaki önleyici ve kestirimci bakım teknolojilerinin uygulanmasındaki temel maksat “U” eğrisinin orta kısmını oluşturan “sabit arıza oranı” kısmının süresini artırarak ekipman ömrünü uzatmaktır (Wyrwas et al., 2011) (Klutke et al., 2003).

Son 40-50 yılda elektrik motorları ve bileşenlerinde meydana gelen arızaların önüne geçmek, kullanım sürelerini artırmak ve verim kayıplarını azaltmak için birtakım bakım yöntemleri bulunmuş ve geliştirilmiştir. Bunlar reaktif bakımdan farklı olarak; önleyici bakım, kestirimci bakım ve güvenilirlik merkezli bakımdır.

Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan araştırmaya göre yaygın olarak kullanılan bakım yöntemi reaktif bakımdır. Uygulamaya göre tüm bakım yöntemlerinin dağılımı Şekil 2’deki grafikte verilmiştir (G. P. Sullivan, Pugh, Melendez, & Hunt, 2010).



Şekil 2. Bakım yöntemlerinin uygulanma oranları
Figure 2. Application rates of maintenance methods

Ekipmanların Kritiklik Durumuna Göre Sınıflandırılması (Classification of Equipments According to Critical Status)

Fabrikalardaki ekipmanlar kullanım yerleri, kullanım amaçları ve arıza esnasında üretime verdiği zararlar açısından fabrikada farklı öneme sahiptirler. Sahip oldukları önem derecesinde sınıflandırılarak uygun bakım yöntemi seçilmektedir. Bu kapsamda ekipmanlar kritik, temel ve genel amaçlı olmak üzere üçe ayrılır. Bu ayrımında kritik ekipmana kestirimci bakım, temel ekipmanlara önleyici bakım, genel amaçlı ekipmanlara da reaktif bakım uygulanması önerilmektedir (Scheffer & Girdhar, 2004).

Bir ekipmanın kritik ekipman sayılabilmesi için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011) (Onawoga & Akinyemi, 2010):

- Ekipman arızası tesis güvenliğini tehlikeye atıyorsa,
- Ekipman arızası üretimi kısıtlıyorsa,
- Ekipmanın gücü büyük, başlangıç yatırım ve onarım maliyeti yüksek, onarım süresi uzunsa,
- Arızaları giderildiğinde yüksek enerji tasarrufu sağlayıp üretimi iyileştiriyorsa.

Bir ekipmanın temel ekipman sayılabilmesi için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011):

- Ekipman arızası tesis güvenliğini tehlikeye atıyorsa,
- Ekipman arızası üretimin bir kısmını engelliyorsa,
- Yüksek güç ve yüksek hızda çalışan ekipmanlar olmasına rağmen sürekli olarak çalıştırılmıyorsa,
- Yapıları gereği zamana dayalı bakıma ihtiyaç duyuluyorsa,
- Orta düzeyde masrafa, bakım uzmanlığına ve tamir süresine sahipse.

Bir ekipmanın genel amaçlı ekipman sayılması için aşağıdaki şartları taşıması gerekir (Scheffer & Girdhar, 2004) (Börjesson & Svensson, 2011):

- Oluşan arıza tesis güvenliğini etkilemiyorsa,
- Tesiste üretim için kritik konumda değilse,
- Ekipman sadece ihtiyaç duyulduğunda çalıştırılıyorsa ya da bir yedeği mevcutsa,
- Ekipmanlar düşük ila orta derecede maliyete, bakım uzmanlığına ve bakım süresine sahipse,
- Ekipmanın arızası diğer ekipmanlara zarar vermiyor ya da vereceği zarar asgari düzeyde ise.

Elektrik motorlarında bakım yöntemleri ilkelden gelişmişe doğru aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

REAKTİF BAKIM (REACTIVE MAINTENANCE)

Reaktif bakım, bakım türlerinin içerisinde ilk kullanılmaya başlanan ve uygulaması en kolay olan bakımdır. Reaktif bakımda ekipmanların kullanımı "bozulana kadar çalıştırın" esasına dayanır. Bu bakımda ekipman bozulana kadar çalıştırılır ve bozulduktan sonra teknik ekip tarafından tamir edilir. Tamirin mümkün olmadığı durumlarda öncelikle ekipmanın yetkili servisinden yardım istenir yine sonuç alınmazsa ekipmanı değiştirme yoluna gidilir. Reaktif bakım her ne kadar en ilkel bakım yöntemi olsa da birtakım avantajlara sahiptir. Reaktif bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (Piotrowski, n.d.) (NASA, 2000) (G. P. Sullivan et al., 2010).

Avantajları (Advantages):

- Reaktif bakım uygulanan ekipmanlarda herhangi bir yatırıma ihtiyaç duyulmaz.
- Teknik personelin çok sayıda ve kalifiye olmasına gerek yoktur. Bu da işçi maliyetlerini düşürür.
- Diğer bakım programlarındaki gibi plan/program yapmaya ihtiyaç duyulmaz.

Dezavantajları (Disadvantages):

- Ekipmanların plansız duruşlarından dolayı ürün maliyetleri artar.
- Ekipmanların tamir ya da değiştirme maliyeti yüksektir ve bunu yapan teknik personele ek mesai ücreti ödenir.
- Ekipmanların bozulması, birlikte çalıştığı diğer ekipmanlara da zarar verir.
- Ekipmanın kullanım süresi, üretici firmalarının vermiş olduğu kullanım ömrünün altında kalır.
- Teknik personelin çalışma verimliliği bir hayli düşüktür.
- Ekipmanın tamirinde kullanılacak olan yedek parça/malzeme temini için geçen sürede ekipmanın yapmakta olduğu iş aksar.
- Bozulan ekipman tamir edilirken dikkatsiz ve hızlı iş yapılması sonucunda bakım personeli risk altında çalışır.
- Ekipman arızalarının zamanı bilinmediği için siparişin müşteriye gitme süresi uzayabilir ve firmanın piyasadaki imajı olumsuz yönde etkilenebilir.
- Bakımı yapılmayan ekipmanların verimi düşeceğinden dolayı daha fazla enerji tüketimi olur.

ÖNLEYİCİ BAKIM (PREVENTIVE MAINTENANCE)

Ekipmanlarda olası arızaları önlemek amacıyla zamana ya da kullanım alışkanlığına bağlı olarak uygulanan bakıma önleyici bakım denir. Bu bakım yönteminde genelde takvime bağlı kalınır ve belirli periyotlarla yağ değişimi, filtre değişimi/temizliği gibi bakım uygulamaları tekrarlanır. Böylece ekipman üreticileri tarafından belirtilen kullanım ömrü yakalanmış, hatta geçilmiş olur.

Örneğin üç fazlı asenkron motorun tahrik ettiği bir pompaya önleyici bakım çerçevesinde yağ bakımı yapıldığı düşünülürse bu sistemin kapalı bir sistem olmasından dolayı çalışma sıcaklığına bağlı olarak 2-3 yılda bir yağ bakımı yapılması önerilmektedir (Kirazlılar, 2007).

Amerika'da yapılan çalışmalara göre önleyici bakım, reaktif bakıma göre ortalama %12-18 daha verimlidir. Önleyici bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (G. P. Sullivan et al., 2010) (NASA, 2000) (G. Sullivan, Pugh, Melendez, & Hunt, 2002).

Avantajları (Advantages) :

- Yüksek maliyetli proseslerde bakım giderleri azalır.
- Ekipmanın çalışma ömrü uzar.
- Ekipmanın çalışma verimi artacağından dolayı enerji tasarrufu sağlanır.
- Ekipman ya da proses arızaları azalır.
- Reaktif bakıma göre yaklaşık %12-%18 arasında daha az bakım gideri olur.

Dezavantajları (Disadvantages) :

- Ciddi arızaların meydana gelme ihtimali ortadan kalkmaz.
- Diğer bakım yöntemlerine göre daha yoğun iş gücü gerektirir.

- Ekipmanın bakıma ihtiyacı olmasa bile takvime uygun olarak yapılan bakım gereksiz uğraşlara yol açar.
- Gereksiz yere uygulanan bakım nedeniyle ekipmanda rastgele arıza çıkma ihtimali oluşur.

KESTİRİMCİ BAKIM (PREDICTIVE MAINTENANCE)

Kestirimci bakım, ekipmanların durumlarının izlenerek arıza çıkarma ihtimallerinin değerlendirilmesi ve arıza çıkarmadan önce önlem alınması olarak tarif edilebilir. Diğer bir deyişle ekipman takip edilir, izlenir ve ileride hangi arızaları çıkaracağı tahmin edilir. Kestirimci bakımın önleyici bakımdan farkı zamana değil ekipmanın durumuna dayalı bir bakım olmasıdır. Kestirimci bakım en gelişmiş bakım yöntemidir ve birçok sektörde uygulanmaya başlansa da özellikle elektrik santralleri, iletişim sistemleri ve acil servisler gibi arızanın büyük zararlar vereceği sektörlerde daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Selcuk, 2017).

Bir kestirimci bakımda veri toplama, veri işleme ve bakıma karar verme gibi üç temel adım vardır. Bunun sonucunda arızanın kök nedenine inilerek o arızaya neyin neden olduğu, alınan sinyalin birden fazla arızayı işaret edip etmediği, oluşacak arızanın ne kadar zaman sonra olacağı gibi bilgileri derleyerek teşhis ve öngörü oluşturur (Jardine, Lin, & Banjevic, 2006).

Kestirimci bakımda oluşacak arızayı önlemenin yanı sıra ekipmanın verimli çalışması, ürünlerin kalitesinin artırılması, güvenilirlik, sürdürülebilirlik ve enerji maliyetlerinde azalma amaçlanmaktadır (Lin & Tseng, 2005).

Kestirimci bakım ile ilgili yine fabrikadaki asenkron motor tarafından tahrik edilen pompa örneği verilecek olursa pompa yağının 2 yılda bir değiştirilmesi önleyici bakım olarak kabul edilirken yağın gerekli takibi yapılarak değişmesine karar verme işlemi kestirimci bakım olarak kabul edilir. Yani yağ değişiminin kararına yağ analizi yaparak karar verilmelidir, ihtiyaç varsa değiştirilmelidir. Yağ analizi yapılmaksızın zamana bağlı bakım uygulandığı takdirde pompanın yağı gerektiğinden erken ya da geç değiştiriliyor olabilir. Yağın gereğinden erken değiştirilmesi boşuna yağ ve bakım masrafına, bakım nedeniyle üretimin kesilmesine, planlama için gereksiz uğraşa ve çevre kirliliğine yol açarken; geç değiştirilmesi de motorun tamamen arızalanmasına, plansız duruşlara, üretimin aniden kesilmesine ve ekipman ve ekipmana bağlı diğer bileşenlerde gerçekleşen daha büyük arızalara neden olabilir. Kestirimci bakım ile ekipmanlara gereğinden önce ya da sonra bakım yapılmadığı için bu bakım, "tam zamanında bakım" olarak da adlandırılır (Lee & Wang, 1999).

Makine arızalarının %99'u önceden belirti göstermektedir (Geitner & Bloch, 2012). Eğer kestirimci bakım doğru uygulanırsa ciddi ekipman arızalarının önüne geçilebilir ya da en aza indirilebilir. Kestirimci bakım ile ekipman üzerinde fazla ya da eksik bakım yapılmasından kaçınılır. Kestirimci bakımın avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (NASA, 2000) (G. Sullivan et al., 2002).

Avantajları (Advantages):

- Bileşenin ömrü önemli ölçüde artar.
- Ekipman arızaları azalır.
- Malzeme giderleri ve işletme maliyetleri azalır.
- Üretimin kalitesi artar.
- Bozulan ekipmanın tamirinde acele edilmeyeceğinden dolayı işçi ve çevre güvenliğinin artması sağlanır.
- Personelin iş gücü veriminin artması sağlanır.
- Önleyici bakıma göre yaklaşık %8-%12 arasında daha az bakım gideri olur.
- Enerji tasarrufu sağlanır.

Dezavantajları (Disadvantages) :

- Durumu izlenen ekipmanın maliyeti artar.
- Teknik personelin eğitim maliyeti artar.
- Fabrika yönetimi tasarruf potansiyelini görmekte zorlanır.

Kestirimci bakımın uygulanmasında gerekli cihaz ve eğitim maliyetinin yüksek olması, bu bakım programının uygulanmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Bu bakım stratejisinin uygulanabilmesi için sadece gerekli donanımın satın alınması yetmez, fabrika yönetiminin desteği ve bakım ekibinin kestirimci bakım felsefesine inanması ve içselleştirmesi gerekir. Aşağıda kestirimci bakımın üstünlüklerini gösteren birtakım veriler sunulmuştur (G. Sullivan et al., 2002):

- Yatırım geri dönüş oranı: 10 kat
- Bakım maliyetlerindeki düşüş oranı: %25-30
- Beklenmedik duruşların ortadan kaldırılma oranı: %70-75
- Arıza süresinin azalma oranı: %35-45
- Üretimdeki artış oranı: %20-25

GÜVENİLİRLİK MERKEZLİ BAKIM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE)

Güvenilirlik merkezli bakım herhangi bir ekipmanın işletme koşullarında ve tasarım ömrü içerisinde bakım gereksinimlerinin belirlenmesi olarak tanımlanmaktadır. Bir tesisin güvenli ve verimli şekilde işletilmesinde ekipmanların hepsi aynı öneme sahip olmadıkları için bunlara uygulanacak bakım yöntemleri de farklılık göstermektedir. GMB ekipmanlara reaktif, önleyici ya da kestirimci bakımdan hangilerinin uygulanması gerektiğini belirleyen bakım metodolojisidir.

Ekipmanlar üzerinde farklı bakım yöntemlerine ihtiyaç duyulmasının nedenleri arasında her ekipmanın tesis için farklı öneme, işleve, özelliğe ve farklı arıza çıkarma eğilimine sahip olması gibi etmenler vardır.

GMB metodolojisinden ilk olarak 1960'ların sonu ile 1970'lerin başında hava yolu endüstrisinde çalışma yapan Nowlan ve Heap'in yayınında bahsedilmiştir. Bu çalışmada ekipmanlar uzun süre takip edilmiş ve ekipmanın yaşı ile arıza oranlarının arasında güçlü bir ilişki olmadığı, zamana bağlı bakımın ekipmanların çoğu için öncelikli yöntem olduğu düşüncesinin hatalı olduğu ortaya konmuştur (Nowlan & Heap, 1978). GMB'nin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Ahmad & Kamaruddin, 2012) (NASA, 2000) (G. Sullivan et al., 2002).

Avantajları (Advantages):

- Verimi en yüksek olan bakım programıdır.
- Gereksiz yere yapılacak olan bakım ve revizyonların ortadan kaldırılmasıyla maddi tasarruf sağlanır.
- Revizyon ve bakım sıklıkları en aza indirilir.
- Ekipmanların aniden arızalanma olasılıkları azalır.
- Kritik ekipmanlar için bakım aktivitelerine odaklanılır.
- Ekipman güvenliği artırılır.
- Arıza nedenlerinin köküne inilir.

Dezavantajları (Disadvantages):

- Yatırım ve bakım için gerekli ekipman maliyetleri ile personel eğitimlerinin masrafı yüksektir.
- Fabrika yöneticilerinin tasarruf potansiyelini görmesi zordur.

GMB'yi oluşturan bakım yöntemlerinin oranları aşağıdaki gibidir:

- <%10 Reaktif Bakım
- %25 ile %35 Önleyici Bakım
- %45 ile %55 Kestirimci Bakım.

Yukarıdaki dağılımdan da görüleceği gibi GMB'de en fazla tercih edilen bakım yöntemi kestirimci bakımdır. Burada asıl amaç, ekipmanlara en uygun bakım yöntemini en düşük maliyetle uygulayarak arızaların önüne geçebilmek ve prosesin sürekliliğini sağlamaktır. Kestirimci bakımın tüm ekipmanlara

uygulanması maddi açıdan fazla yük sağlayacağından dolayı diğer bakım yöntemlerinden de faydalanılmaktadır. Her bir arıza ve ekipman için optimum bakım yöntemi seçilerek tesisin güvenliği maksimum seviyeye çıkarılabilir. Çizelge 2’de GMB içerisindeki bakım uygulamaları görülmektedir (NASA, 2000).

Çizelge 2. Güvenilirlik merkezli bakım uygulamaları

Table 2. Reliability-centered maintenance applications.

Güvenilirlik Merkezli Bakım Hiyerarşisi		
Reaktif Bakım Uygulaması	Önleyici Bakım Uygulaması	Kestirimci Bakım Uygulaması
Küçük parça ve ekipmanlar	Aşınmaya maruz kalan ekipmanlar	Rastgele arıza çıkaran ekipmanlar
Kritik olmayan ekipmanlar	Sarf ekipmanlar	Kritik ekipmanlar
Bozulma ihtimali çok düşük olan ekipmanlar	Arızaları bilinen ekipmanlar	Aşınmaya maruz kalmayan ekipmanlar
Yedekli ekipmanlar	Üretici önerileri bu bakım yöntemi doğrultusunda olan ekipmanlar	Yanlış önleyici bakım uygulanmasıyla arıza oluşması muhtemel durumlar

KESTİRİMCİ BAKIM YÖNTEMLERİ (PREDICTIVE MAINTENANCE METHODS)

Teknolojinin gelişmesi ve bakım konusundaki ihtiyaçların artması, farklı kestirimci bakım yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamıştır. Çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bunlar; yağ ve parçacık testi, titreşim (vibrasyon) testi, termal kamera ile ısı görüntüleme testi, ultrasonik test, motor akımı imza analizi, model bazlı arıza analizi ve performans izleme yöntemleridir.

YAĞ VE PARÇACIK TESTİ (OIL AND PARTICLE TEST)

Yaygın olarak kullanılan kestirimci bakım yöntemlerinden biri yağ ve parçacık testidir. Yağ ve parçacık testi ile ulaşılmak istenen iki temel hedef vardır. Bunlardan ilki ekipmanın yağında biriken kirleticilerin tespit edilmesi, ikincisi ise yağ içerisinde aşınmalardan kaynaklı oluşan parçacıkların bulunmasıdır. Yağ ve parçacık analizi amaca bağlı olarak farklı şekillerde yapılmaktadır. Bunlardan Karl Fischer Water test; yağın içerisindeki su miktarının tespitinde kullanılır, ICP spektroskopisinde yağ içerisindeki metal parçacıkların yoğunluğu belirlenir, partikül sayımı testi ile yağdaki parçacıkların miktarı ve boyutu hakkında bilgi edinilir, viskozite testi ile yağın viskozitesi ölçülür. Bu sayılanların haricinde başka yağ ve parçacık test yöntemleri de mevcuttur. İçerisinde yağın kullanıldığı neredeyse tüm ekipmanlar için yağ ve parçacık testleri uygulanabilir (Wakiru, Pintelon, Muchiri, & Chemweno, 2019) (Levitt, 2011).

Çevresel açıdan değerlendirildiğinde de yağ analizi önem arz etmektedir. Çünkü dünyadaki toplam kimyasal üretimin %8.5’ini endüstriyel yağlamada kullanılan yağlar oluşturmaktadır. Yağ analizi sayesinde gereksiz yağ değişimlerinin önüne geçilerek toprak ve su kirliliği engellenmiş olur. Yağ ve parçacık testinin uygulama alanları arasında türbinler, dişli kutular, servo valfler, hidrolik sistemler, pompalar, elektro-hidrolik sistemler ve rulman yatakları vardır (Gresham & Totten, 2009). Şekil 3’te yağ ve parçacık testinde kullanılan ekipmanlar görülmektedir.



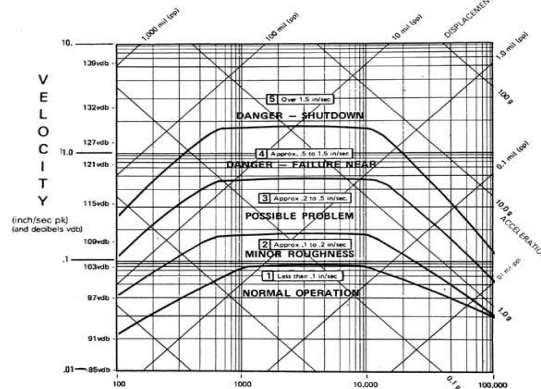
Şekil 3. RM100L endüstriyel vizkozimetre ve BT-9300ST lazer parçacık boyutu analiz cihazı
Figure 3. RM100L industrial viscometer and BT-9300ST laser particle size analyser.

TİTREŞİM ANALİZİ (VIBRATION ANALYSIS)

Titreşim analizi kestirimci bakım yöntemlerinin içerisinde en yaygın olarak kullanılan bakım yöntemidir. Ekipmanlar çalışma esnasında arızalı olmasa dahi belirli titreşim seviyesine sahiptirler. Ancak belirli bir arızası olan ekipmanlar tarafından normal titreşim seviyelerinin üzerinde bir titreşim sergilenir. Bu gerçekleşen anormal titreşim miktarı ekipman arızalarının tespit edilmesinde teknik personele yardımcı olur (Bauer, Geropp, & Seeliger, 1997).

Titreşim analizinin en başarılı uygulamaları döner ve pistonlu ekipmanlar üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu ekipmanlar üzerinde ya belirli aralıklarla ya da sürekli olarak titreşim analizi uygulanır (Goyal & Pabla, 2015). Titreşim analizi uygulanırken ölçümlerin ekipman üzerindeki hep aynı noktalardan alınması önerilmektedir. Böylece ölçümler kendi aralarında karşılaştırılıp ekipmanın durumu değerlendirilebilir. Uygulamada alınan her ölçümün direk yorumlanmasından ziyade genel bir titreşim seviyesi belirlenir ve bu seviyenin üzerindeki titreşime sahip ekipmanların titreşim grafikleri yorumlanır. Bu sonuçları yorumlamak için uzman personele ihtiyaç vardır ve iyi bir yorumlama için yapay sinir ağları gibi sınıflandırma ve tahmin yöntemlerinden yardım alınır (UGECHI, OGBONNAYA, LILLY, OGAJI, & PROBERT, 2009).

Ekipmanların arızalarını yorumlayabilmek için Şekil 4'teki gibi bir uyarı spektrumunun hazırlanması gerekir. Ekipmanın arıza durumu değerlendirilirken titreşim bu grafiklerde belirtilen üst sınırları aştığı zaman kesinlikle arıza çıkaracaktır ya da grafikte belirlenen değerler arasında ise kesinlikle verimli ve sorunsuz şekilde çalışacaktır yorumunu yapmak mümkün değildir. Diğer bir deyişle arızanın olup olmayacağı ile ilgili kesinlikten söz edilemez. Ancak her tesisin titreşim artışlarında müdahalede bulunabilmesi için kendi üst sınırını belirlemesi gerekmektedir (Tabak, 2014).



Şekil 4. Titreşim uyarı spektrumu
Figure 4. Vibration warning spectrum

Sanayide titreşim ölçümleri için anlık ölçümler alan portatif ölçüm cihazları ve sürekli ölçüm alan yerleşik cihazlar kullanılmaktadır. Sürekli ölçüm alan yerleşik cihazlar verileri anlık kaydedip teknik personele iletirler. Fabrikalardaki idare kendi mali gücüne ve ekipmanların kritikliğine göre hangi

yöntemle ölçüm alacaklarına kendileri karar verir. Şekil 5'te hem belirli aralıklarla ölçüm almak için tasarlanan portatif cihaz hem de sürekli ölçüm alan yerleşik cihaz görülmektedir.



Şekil 5. SKF portatif titreşim cihazı ve GE Bently Nevada 3500 Encore serisi sürekli ölçüm cihazı

Figure 5. SKF portable vibration equipment and GE Bently Nevada 3500 Encore series continuous measuring equipment

Sürekli ölçüm alan titreşim cihazlarının bazıları, titreşim değeri belirli bir sınır değerinin üzerine çıktığında ekipmanı devreden çıkarma özelliğine sahiptir. Titreşim analizi ile tespit edilen başlıca arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Scheffer & Girdhar, 2004):

- Dengesizlik,
- Merkezi kaymış rotorlar,
- Kayma,
- Rezonans sorunları,
- Mekanik gevşeklik/zayıflık,
- Rulman problemleri,
- Rulman yatağı problemleri,
- Akış kaynaklı titreşim problemleri,
- Dişli sorunları,
- Kayış tahrikli sorunlar.

TERMAL KAMERA İLE ISIL GÖRÜNTÜLEME TESTİ (THERMAL IMAGING TEST WITH THERMAL CAMERA)

Farklı amaçlar doğrultusunda yaygın olarak kullanılan termal kameraların uygulama alanlarından biri de kestirimci bakımdır. İnsan gözünün görebildiği dalga boyu 400 nm-700 nm aralığındadır. Elektromanyetik spektrumda dalga boyu açısından görünür ışığın hemen üzerinde yer alan kızılötesi ışıklardan yararlanarak ısı görüntüleme işlemi yapan termal kameralar, ekipmanların arızalarının tespit edilmesine yardımcı olur. Sürtünen parçalarda, gevşek yapılmış elektrik bağlantılarında ya da arızalı elektrik motorlarında çalışma esnasında ısı ve sıcaklık artışı meydana gelir. Termal kameralar içerisindeki sensörler vasıtasıyla bu sıcaklık değerleri tespit edilir ve arıza noktası belirlenerek arızanın boyutu tahmin edilir (Huda & Taib, 2013). Çizelge 3'te termal kamera yardımı ile elektriksel ve mekanik arızaların tespit edildiği bölgeler gösterilmiştir (Jadin & Taib, 2012).

Çizelge 3. Termal kamera ile elektriksel ve mekanik arızaların tespit edildiği bölgeler

Table 3. Regions where electrical and mechanical faults are detected by thermal camera.

Elektriksel Arızalar	Mekanik Arızalar
İletim hatları	Buhar Sistemleri
Dağıtım hatları/sistemleri	Isıtıcılar ve fırınlar
Trafo Odaları	Akışkanlar
Jeneratör Tesisleri	Motorlar ve döner ekipmanlar
Fabrikalardaki Elektrik Sistemleri	

Şekil 6'da noktasal olarak ölçüm alabilen termal kamera ile yüzey sıcaklığını görüntüleyen termal kamera görülmektedir.



Şekil 6. Nokta ve yüzey sıcaklığını ölçebilen termal kameralar
Figure 6. Thermal cameras that can measure point and surface temperature

ULTRASONİK TEST (ULTRASONIC TEST)

Ultrasonik test, kestirimci bakım yöntemlerinin içerisinde uygulanması en kolay olan test olup bu testte kullanılan cihazın kullanımı ile ilgili teknik personelin herhangi bir eğitim almasına gerek yoktur (Tabak, 2014).

İnsan kulağı 20 Hz ile 20 kHz arasındaki frekanslara sahip sesleri duyabilir. 20 kHz-100 kHz frekans aralığındaki seslere ultrasonik ses denir. Döner ekipmanlar ve akışkan taşıyan sistemler tarafından belirli miktarlarda ultrasonik ses dalgaları yayılır. Eğer ekipmanlarda arıza ya da kayıp/kaçak şeklinde olumsuz bir durum varsa bu ses dalgalarında artış gözlenir. Bu ses farkı ultrasonik dedektörler vasıtasıyla tespit edilerek arızanın yeri, cinsi, boyutu tahmin edilir. Ultrasonik test cihazlarının dezavantajlarından biri ses dalgalarının hava içerisinde yayılarak ilerlemesinden dolayı termal kameralar gibi uzak mesafelerden arıza tespitini gerçekleştirememeleridir. Mesafe uzadıkça algılanan ses azalır ve uzak mesafelerden alınan ölçümlerde arıza tespit edilemez (Buckley, 2007). Şekil 7’de tipik bir ultrasonik test cihazı ile parabolik tabaka yardımıyla ölçüm yapan ultrasonik test cihazı görülmektedir.



Şekil 7. Tipik ultrasonik test cihazı ve parabolik tabaka yardımıyla ölçüm yapan ultrasonik test cihazı
Figure 7. Typical ultrasonic test equipment and ultrasonic test equipment measuring with the help of parabolic layer

Ultrasonik ses detektörü vasıtasıyla kayıp/arıza noktalarının tespit edildiği bölgeler Çizelge 4’te verilmiştir (G. P. Sullivan et al., 2010) (Scheffer & Girdhar, 2004).

Çizelge 4. Ultrasonik test cihazı vasıtasıyla tespit edilen başlıca kayıp/arıza noktaları.

Table 4. Loss/fault points detected by ultrasonic test equipment

Elektriksel Uygulamalar	Mekanik Uygulamalar	Basınç ve Vakum Kaynaklı Sızıntılar
Ark oluşumu/elektrik deşarjları	Mil yatakları	Basınçlı hava
Kesiciler/Anahtarlar	Motorlar	Oksijen, Hidrojen
Transformatörler	Kompresörler	Buhar Kapanları
İzolatörler	Pompalar, Fanlar	Isı deęiřtiriciler
Bağlantı kutuları	Yaęlama eksikliği	Kazanlar, Tanklar
Sigortalar	Diřliler ve dişli kutusu	Boru hatları, Vanalar

MOTOR AKIMI İMZA ANALİZİ (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS)

Ölçüm için fiziksel erişimin ihtiyaç duyulmadığı kestirimci bakım yöntemlerinden biri de motor akımı imza analizi (MAİA) yöntemidir. Motorun akım sinyalinden yola çıkarak arıza tespiti yapabilen MAİA yöntemi, ulaşılması güç olan ekipmanların arızalarını tespit etmede kolaylık sağlamaktadır (S. Singh, Kumar, & Kumar, 2014). MAİA yönteminde arızalar, ölçüm esnasında motorun durdurulmasına ihtiyaç duyulmadan motorun akım sinyalinin frekans spektrumundan her bir frekans bileşeninin pik değerleri incelenerek tespit edilir (Barnish, Muller, & Kasten, 1997).

MAİA'da arızaların tespit edilebilmesi için akım imza spektrumlarına ihtiyaç duyulması, bu yöntemi diğer kestirimci bakım yöntemlerinden biraz daha karmaşık hale getirmektedir. Ayrıca şebeke gerilimlerinde oluşan rastgele gürültüler de akım sinyalinin yorumlanmasını zorlaştırabilir. Şekil 8'de MAİA yöntemini kullanan kestirimci bakım cihazları görülmektedir.



Şekil 8. Iris Power kestirimci bakım cihazı ve Empath portatif kestirimci bakım cihazı

Figure 8. Iris Power predictive maintenance device and Empath portable predictive maintenance device

MAİA yönteminde arızaların elektrik motorlarının elektrik akım bilgisinden yola çıkılarak tespit edilmesine rağmen sadece elektriksel arızalar değil mekanik arızalar da bulunur. MAİA ile tesislerdeki fan, pompa, kompresör, pres makinesi ve konveyörler üzerinde çeşitli elektriksel veya mekanik arızaların tespiti mümkündür. MAİA yöntemi ile tespit edilen arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Mehala & Dahiya, 2007):

- Stator arızaları,
- Rotor arızaları,
- Sargı gevşekliği,
- Kısa devre,
- Dişli aşınması,
- Balanssızlık,
- Eksenel kaçıklık,
- Aktarma elemanı,
- Rulman aşınmaları.

MODEL BAZLI ARIZA ANALİZİ (MODEL BASED FAULT ANALYSIS)

Model bazlı arıza analiz (MBAA) yöntemi diğer kestirimci bakım yöntemlerinin birtakım dezavantajlarını yok etmek üzere geliştirilen bir kestirimci bakım yöntemidir. Çalışma prensibine bakıldığında üç fazlı bir sistemin modeli ile bu sistemin ölçülen değerleri karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonrasında beklenmedik bir farklılık görülürse arıza oluşmaya başlamış demektir. MBAA cihazı ilk etapta sistemden bir süre gerçek zamanlı veri alır ve bu veriyi işleyerek öğrenme sürecini gerçekleştirir. Model parametrelerinin elde edilebilmesi için birtakım sistem tanıma algoritmaları vasıtası ile bu veriler işlenir. Sistem parametrelerinde gerçekleşen değişimler oluşan arızayı bildirir (Duyar, 2009). Şekil 9'da Artesis AMT portatif kestirimci bakım cihazı ve Artesis MCM sürekli ölçüm alan kestirimci bakım cihazı görülmektedir.



Şekil 9. Artesis AMT portatif kestirimci bakım cihazı ve Artesis MCM sürekli ölçüm kestirimci bakım cihazı

Figure 9. Artesis AMT portable predictive maintenance device and Artesis MCM continuous measurement predictive maintenance device

MBAA yöntemi ile tespit edilen arıza çeşitleri aşağıda verilmiştir (Duyar, Önel, & Özdemir, 2016) :

- Gevşek zemin ve komponentler,
- Balanssızlık ve aksel kaçıklık,
- Aktarma elemanları ve sürülen ekipman arızaları,
- Rulman arızaları,
- Rotor arızaları,
- Stator ve izolasyon arızaları,
- Akım ve gerilim dengesizliği,
- Dahili ve harici elektriksel arızalar.

PERFORMANS İZLEME (PERFORMANCE MONITORING)

Prosesin sıcaklığı, nemi, basıncı, verimliliği ya da motorların elektriksel ölçüm verileri sistemin durumu hakkında bilgi vermektedir. Bu parametrelerdeki değişiklik, üretim hızındaki azalma ya da ürün kalitesindeki düşüş bize negatif yönlü bir geri bildirim sağlar. Böylece performansı izlenen sistem ile ilgili yorum yapabiliriz. Performans izleme yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, anormal ölçüm değerlerinin arızayı işaret etme garantisinin olmamasıdır (Selcuk, 2017).

İNTERNET VE UZAKTAN ERİŞİMİN KESTİRİMCİ BAKIMA ENTEGRASYONU (INTEGRATION OF INTERNET AND REMOTE ACCESS TO PREDICTIVE MAINTENANCE)

Bilginin sensörler vasıtasıyla toplanması, mesafe sınırı olmaksızın iletilmesi, boyutu göz ardı edilerek işlenmesi, depolanması ve değerlendirilmesi gibi işlemler vasıtasıyla kestirimci bakım uygulaması kolaylaşmaktadır. Bu kolaylık, kestirimci bakımın uygulamasına katkı yapmasının yanında maddi getiri açısından da avantaj sağlamaktadır. Çünkü ölçüm değerlerinin uzaktan erişim yapılarak alınması ile uygulanan kestirimci bakımda fabrikada eğitimli personel istihdam edilmesine gerek duyulmaz. Böylece fabrikadaki ekipmanlar üzerinde gerekli ölçüm değerleri alınarak gerekli durum değerlendirmesi yapılır. Bu bilgiler, uzaktan erişim sayesinde başka bölgelerde istihdam edilmiş uzman teknik personel tarafından alınıp incelenerek buna göre bir bakım hamlesine karar verilebilir (Crespo Márquez, 2007).

Son yıllarda “e-bakım”, “uzaktan bakım ve yönetim sistemleri”, “tele-bakım”, “nesnelerin interneti” ve “radyo frekansı ile tanımlama” gibi kavramlar kestirimci bakım üzerinde uygulanmaktadır. Bunlardan e-bakım; internet üzerinden ekipmanların izlendiği ve yönetildiği bakım yönetim konsepti olarak tanımlanmakta ve kavram olarak 2000’lerin başından beri kullanılmaktadır. Uzaktan bakım ve yönetim sistemleri tehlikeli ve uzak lokasyonlardaki ekipmanlar için önerilmiştir. Tele-bakım; bilişim ve iletişim teknolojileri vasıtasıyla sistemdeki verilerin uzaktan alınarak arızaların algılanmasını ve onarımın sınırlı bir şekilde uygulanmasını sağlayan bakım konseptidir. Nesnelerin interneti, kestirimci bakımda kullanılan henüz çok yeni bir teknolojidir. İnternet vasıtasıyla ekipmanların birbirine bağlı olma durumundan yola çıkarak tüm ekipmanların oluşturduğu ortak etki ile arızalar tespit edilmekte ve bakımı yapılmaktadır. Radyo frekansı ile tanımlamanın geniş uygulama alanlarından bir tanesi de kestirimci

bakım üzerinedir. Böylece ekipmanın tanınması ve takibi gibi özelliklerinin yanı sıra bakımla ilgili arıza kayıtlarının tutulması da sağlanır (Selcuk, 2017). Bunların yanında, arıza belirtilerinin bulut tabanlı durum izleme sistemleri vasıtasıyla sürekli değerlendirildiği (Gun et al., 2020) ve enerji tüketimi ile karbon emisyonunu minimuma indirme amacıyla yapay zekanın kullanıldığı bakım stratejileri (G. Singh, Anil Kumar, & Naikan, 2019) de yapılan çalışmalar arasında kendine yer bulmaktadır. İleriki zamanlarda kestirimci bakımda uzaktan izleme, değerlendirme ve bakıma karar verme yöntemlerinin çeşitlendirileceği ve daha fazla kullanılacağı öngörülmektedir.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışmada sanayide uygulanan bakım stratejileri sınıflandırılmış, bu stratejilerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiş, ekipmanlar üzerinde hangi bakım tekniklerinin uygulanacağı ile ilgili bilgi verilmiş ve uzaktan erişimin kestirimci bakım ile olan etkileşimi anlatılmıştır.

Bakımın ürün maliyetleri üzerindeki etkisi, birbirlerine yakın lokasyonlarda bulunan ve aynı ürünü üreten tesislerin karşılaştırılması ile daha iyi anlaşılmaktadır. Çünkü rekabetçi piyasada bir ürünün maliyeti üretim tesisleri arasında birbirine çok yakın seyretmektedir ve eğer bir tesis diğerinden daha uygun maliyetle üretim yapmak istiyorsa mutlaka elektrik motorları gibi yüksek ve yoğun elektrik enerjisi tüketen ekipmanların bakımlarını zamanında yapması, arızaların daha oluşmadan önüne geçmesi ve ekipmanların arızalı şekilde çalışmasından dolayı gerçekleşen enerji kaybını engellemesi gerekmektedir. Bu nedenle kestirimci bakım ya da GMB gibi gelişmiş yöntemlerin uygulanması kaçınılmaz bir hal almıştır.

Günümüzde kestirimci bakımın ve GMB'nin uygulanmasının önünde hala birtakım engeller bulunmaktadır. Kestirimci bakım ve GMB'nin uygulanmasının önündeki en büyük engeller gerekli donanım ve personel eğitimlerinin sağlanmasının güçlüğü olarak ifade edilse de arızanın kök nedeninin tespit edilmesinin teknik personelin hatasını ortaya çıkaracağı korkusu ve kestirimci bakımın getirdiği maddi avantajların idare tarafından görülmesinin zor olması gibi nedenler de sayılmalıdır.

Son zamanlarda kestirimci bakıma uzaktan erişim ve internet altyapısının eklenmesi bakımın daha profesyonelce ve daha uygun maliyetle yapılmasını mümkün hale getirmekle beraber pandemi gibi tüm dünyayı etkileyen olaylar karşısında üretimin sürdürülebilirliğini sağlamaktadır. Böylece kestirimci bakımın dezavantajlarından olan personel eğitimlerinin yüksek maliyetli olması gibi durumlar artık söz konusu olmaktan çıkacaktır. Görünen o ki piyasa şartları zorlaştıkça sadece bakıma yeteri kadar önem vererek gerekli bakım hamlelerini zamanında yapan tesisler ayakta kalabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, 63(1), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.02.002>
- Barnish, T. J., Muller, M. R., & Kasten, D. J. (1997). Motor maintenance: A survey of techniques and results. *Proceedings ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, 287–297.
- Bauer, B., Geropp, B., & Seeliger, A. (1997). Condition Monitoring and Predictive Maintenance in Mining Industry Using Vibration Analysis for Diagnosis of Gear Boxes. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18), 989–992. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)42529-8](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)42529-8)
- Börjesson, A., & Svensson, A. (2011). *Critical equipment classification and cost reduction within professional maintenance*. 1–115.
- Brown, P., & Sondalini, M. (2015). Asset maintenance management - The path toward defect elimination. *Lifetime Reliability Solutions*, 3.
- Buckley, J. M. (2007). AN OVERVIEW OF THE PREDICTIVE MAINTENANCE APPLICATIONS OF AIRBORNE ULTRASOUND TESTING . INTRODUCTION A Note on Terminology Principles of Operation. *4th International Conference on NDT*.
- Crespo Márquez, A. (2007). The Maintenance Management Framework. *The Maintenance Management*

- Framework. <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-821-0>
- Duyar, A. (2009). Model Bazlı Arıza Analizi ve Kestirimci Bakım. *Mühendis ve Makina*, 50(598), 1–9.
- Duyar, A., Önel, İ. Y., & Özdemir, H. (2016). İnovatif Model Bazlı Arıza Erken Uyarı Yazılımıyla Beklenmedik Duruşlara Son Verme. *Mühendis ve Makina*, 57(672), 44–48.
- Enerji Verimliliği ve Çevre Dairesi Başkanlığı, “EnVer Motor Hareketi,” TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. [Online]. Available: http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/b_en_mot_hareketi.aspx. [Accessed: 08-Apr-2020].
- Geitner, F. K., & Bloch, H. P. (2012). *Machinery Failure Analysis And Troubleshooting, Practical Machinery Management for Process Plants*. TX, USA: Butterworth-Heinemann.
- Goyal, D., & Pabla, B. S. (2015). Condition based maintenance of machine tools-A review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 10, 24–35. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.05.004>
- Gresham, R. M., & Totten, G. E. (2009). *Lubrication and Maintenance of Industrial Machinery: Best Practices and Reliability*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Gun, B., Jae, W., Huang, A., Sutherland, J. W., Jae, W., & Sutherland, W. (2020). Development and Application of a Method for Real Time Motor Fault Detection. *Procedia Manufacturing*, 49, 94–98. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.07.002>
- Huda, A. S. N., & Taib, S. (2013). Application of infrared thermography for predictive/preventive maintenance of thermal defect in electrical equipment. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.028>
- Jadin, M. S., & Taib, S. (2012). Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Physics and Technology*, 55(4), 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2012.03.002>
- Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>
- Kirazlılar, B. (2007). *Endüstriyel Bakım: Kestirimci Bakım ve Önleyici Bakımın Temelleri ve Ustalarına Pratik Metotları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Klutke, G. A., Kiessler, P. C., & Wortman, M. A. (2003). A critical look at the bathtub curve. *IEEE Transactions on Reliability*, 52(1), 125–129. <https://doi.org/10.1109/TR.2002.804492>
- Lee, J., & Wang, B. (1999). *Computer Aided Maintenance* (p. 7). p. 7. New York: Springer.
- Levitt, J. (2011). *Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance*. New York: Industrial Press Inc.
- Lin, C. C., & Tseng, H. Y. (2005). A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25(1–2), 174–179. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1835-3>
- Martin, K. F. (1994). A review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 34(4), 527–551. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)90083-3](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)90083-3)
- Mehala, N., & Dahiya, R. (2007). Motor Current Signature Analysis and its Applications in Induction. *International Journal*, 2(1), 29–35.
- Mergen, F., & Zorlu, S. (2009). *Elektrik Makineleri 2 Asenkron Makineler*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- NASA. (2000). *Reliability Centered Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment*. Washington, D.C.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. United Airlines and Dolby Press, sponsored and published by the Office of Assistant Secretary of Defense.
- Onawoga, D. T., & Akinyemi, O. O. (2010). Development of Equipment Maintenance Strategy for Critical Equipment. *Pacific Journal of Science and Technology*, 11(1), 328–342.
- Piotrowski, J. (n.d.). Effective Predictive and Pro-Active Maintenance for Pumps. Retrieved April 8, 2020, from <http://www.maintenanceworld.com/effective-predictive-and-pro-active-maintenance-for-pumps/>
- Scheffer, C., & Girdhar, P. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*.

- <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-075066275-8/50001-1>
- Selcuk, S. (2017). Predictive maintenance, its implementation and latest trends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(9), 1670–1679. <https://doi.org/10.1177/0954405415601640>
- Singh, G., Anil Kumar, T. C., & Naikan, V. N. A. (2019). Efficiency monitoring as a strategy for cost effective maintenance of induction motors for minimizing carbon emission and energy consumption. *Reliability Engineering and System Safety*, 184(February 2018), 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.02.015>
- Singh, S., Kumar, A., & Kumar, N. (2014). Motor Current Signature Analysis for Bearing Fault Detection in Mechanical Systems. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpc), 171–177. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.021>
- Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., & Hunt, W. D. (2010). Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency. *Federal Energy Management Program*, (August 2010), 321. <https://doi.org/10.2172/1034595>
- Sullivan, G., Pugh, R., Melendez, A., & Hunt, W. (2002). *Best Practices A Guide to Achieving Operational Efficiency*.
- Tabak, A. (2014). *Ekipmanlarda Kestirimci Bakım Teknolojilerinin Araştırılması Ve Seçilen Bir Yöntemin Uygulandığı Sanayi Tesisinde Elde Edilen Neticelerin İrdelenmesi*. Karabük Üniversitesi.
- Tabak, A. (2020). Fırçasız Doğru Akım Motor larının Hız Kontrolünü Gerçekleştirmek İçin PID / PD Kontrolcü Tasarımı ve Performans İncelemesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 145–155. <https://doi.org/10.31590/ejosat.707004>
- TERZİOĞLU, H., & SELEK, M. (2017). Determination of Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors By Using Heuristic Algorithms. *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, 5(2), 170–182. <https://doi.org/10.15317/scitech.2017.80>
- Thomas, J. (2007). *A History of Maintenance: Implementing MP2* (Western Kentucky University). Retrieved from http://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theseshttp://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theses/141%0Ahttp://digitalcommons.wku.edu/stu_hon_theses/141/
- TÜİK. (2019). *Net Elektrik Tüketiminin Sektörlere Göre Dağılımı*, Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara.
- UGECHI, C. I., OGBONNAYA, E. A., LILLY, M. T., OGAJI, S. O. T., & PROBERT, S. D. (2009). Condition-Based Diagnostic Approach for Predicting the Maintenance Requirements of Machinery. *Engineering*, 01(03), 177–187. <https://doi.org/10.4236/eng.2009.13021>
- Verimlilik Genel Müdürlüğü (2015). *Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği*, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Ankara.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*. Paris, France.
- Wakiru, J. M., Pintelon, L., Muchiri, P. N., & Chemweno, P. K. (2019). A review on lubricant condition monitoring information analysis for maintenance decision support. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.08.039>
- Wyrwas, E., Condra, L., & Hava, A. (2011). Accurate quantitative physics-of-failure approach to integrated circuit reliability. *IPC APEX EXPO Technical Conference 2011*, 3(August), 1776–1815.



A NEW APPROACH FOR RULE ESTIMATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM: A CASE STUDY FOR PUBLIC TRANSPORT MAINTENANCE SYSTEM

¹Melike ERDOĞAN , ²İhsan KAYA 

¹Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Düzce, TÜRKİYE

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

¹melikeerdogan@duzce.edu.tr, ²ihkaya@yildiz.edu.tr

(Geliş/Received: 02.01.2020, Kabul/Accepted in Revised Form: 24.08.2020)

ABSTRACT: The increase in the population and the high amount of individual vehicle usage in the big cities brought traffic congestion and environmental problems. Additionally, these issues have also some negative effects on the public transport systems (PTSs). In this respect, the analysis of PTS is critical and important for both city life and people. It is possible that the failures in PTS can lead to many problems. Disruption of daily life, loss of lives and property or damage to the environment are only just a few of these problems. In this context, effective maintenance planning for PTSs is so crucial. In this study, the rule estimation for a fuzzy rule-based system (FRBS) which takes into consideration many factors for the maintenance planning of PTSs is discussed. The rule-based system for maintenance planning of Bus Rapid Transit System (BRT) will be highly effective for the prediction of failures for PTSs and the correct actions to be taken. Rule estimation for this system is aimed to increase the precision and flexibility of maintenance procedures. In this context, a model based on artificial neural networks (ANNs) has been developed and used in rule estimation for FRBS. For this aim, ten cases that are not in the rule base system are estimated and the results of the fuzzy rule-based maintenance inference system for the relevant inputs are revealed. Thus, it has been shown that ANNs can be used effectively for the analysis of rules that are not included in the current rule-based maintenance system.

Key Words: Artificial Neural Networks, Bus Rapid Transit, Estimation, Fuzzy Based Rule System.

Bulanık Çıkarım Sisteminde Kural Tahmini için Yeni Yaklaşım: Toplu Taşıma Bakım Sistemi İçin Bir Örnek Olay Çalışması

ÖZ: Büyük şehirlerde yaşanan nüfus artışı ve bireysel araç kullanımının artması, trafik problemini de beraberinde getirmiştir. Bu durumların neticesinde toplu taşıma sistemlerinin de olumsuz etkilendiği söylenebilir. Bu anlamda toplu taşıma sistemlerini (TTS) analiz etmek, hem şehir hayatı hem de toplu taşıma kullanıcıları için oldukça kritik ve önemlidir. Toplu taşıma sistemlerinde meydana gelebilecek herhangi bir arızanın birçok sorunu beraberinde getireceği söylenebilir. Günlük hayatın aksaması, can ve mal kayıpları ya da çevreye verilen zarar bu sorunlardan yalnızca birkaçıdır. Bu kapsamda, toplu taşıma sistemleri için etkili bir bakım planlama yapılması çok önemlidir. Bu çalışmada, toplu taşıma sistemlerinin bakım planlamasında, birçok faktörü göz önüne alan bir bulanık tabanlı kural sistemi (BKTS) ile kuralların tahmini ele alınmıştır. Metrobüs sisteminin bakım planlamasından kullanılacak kural tabanlı bu sistem, toplu taşıma sistemlerinde olan arızalar ve bu arızalar karşısında alınacak aksiyonların öngörülmesinde oldukça etkili olacaktır. Bu sistem için önerilen kural tahmini ile bakım prosedürlerinin kesinliğinin ve esnekliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, çalışma kapsamında yapay sinir ağları (YSA) geliştirilmiş ve kural tahmini için kullanılmıştır. Bu amaçla, kural tabanında yer almayan on adet durum için tahminleme yapılarak ilgili girdiler için bulanık kural tabanlı bakım çıkarım sisteminin hangi

sonuçları ortaya koyduğu belirlenmiştir. Böylece, YSA'nın mevcut kural tabanlı bakım sistemine dahil olmayan kuralların analizi için etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Sinir Ağları, Metrobus, Tahmin, Bulanık Kural Tabanlı Sistem.

1. INTRODUCTION

With the rapid increase of the population in the big cities and consequently the traffic intensification, public transport has become more and more used. Therefore, this causes the vehicles to wear out more quickly. Failures that may occur in public transport vehicles directly affect human life and city traffic. The maintenance applications for public transport vehicles are critical both for the passengers and the general operation of transportation, especially in crowded cities. In this sense, if timely and correct interventions are performed, failures can be prevented and accidents can also be avoided. There are few studies in the literature addressing failures in public transport and maintenance planning. However, none of them is related to the instantaneous monitoring of failures and making the maintenance decision required for the vehicles. The first study in this context is to create a maintenance decision support system (DSS) for metrobus which is the bus rapid transit system (BRT) (Erdoğan 2018). This system will provide an infrastructure for the maintenance or renewal decision, taking into account the cost, impact and other characteristics of the failures.

The proposed DSS by (Erdoğan 2018) provides recommendations on the measures to be taken in case of failure on metrobus which is the BRT system using in İstanbul, Turkey. With this DSS, the vehicles in the BRT system can be monitored instantly and in the case of failure, decisions for maintenance can be made immediately by taking into consideration many inputs determined before. These decisions can be made without the need for a human decision-maker utilizing the proposed DSS. To model the uncertainties in the process, to incorporate the linguistic evaluations of the decision-makers and to achieve closer results to reality, decision-making under uncertainty approaches are applied. First of all, the failures have been prioritized by using fuzzy and stochastic MCDM methods. Then, taking into account the priorities of failure which is an input for FRBS, the other input variables such as reliability, cost, etc. have been determined and their membership functions have been extracted. Finally, a rule-based DSS has been created for supporting the maintenance planning for BRT. By comparing the current situation with the proposed situation, the advantages of the proposed method are determined and the validity and sensitivity analyzes of the model are also examined. After all these stages, a maintenance DSS has been established in which the maintenance decision can be taken instantly, the failures can be followed and the vehicle conditions can be kept under control.

After this point, in this paper, an ANNs-based estimation approach is proposed to update the rule-based system and to add new rules into the system. The rules that are unpredictable, unexpected, or undefined on the proposed FRBS are estimated by applying ANNs in the data mining software WEKA.

The estimation process can be successfully performed with ANNs approach which can provide nonlinear modeling without any prior knowledge between input and output variables or without making any assumptions (Hamzaçebi and Kutay 2004). Estimation can also be applied efficiently when the input and/or output variables are qualitative or quantitative. At this point, it is also reasonable to apply the estimation of unspecified rule results in rule-based systems whose inputs and outputs are qualitative variables. In this study, the estimation study has been conducted by using this feature of ANNs for the proposed DSS by (Erdoğan 2018).

The rest of this paper has been organized as follows: Section 2 includes brief information about the studies on the maintenance of public transportation by using ANNs. Section 3 provides the estimation methodology for the FRBS of BRT maintenance planning. Section 4 presents a real case study for BRT maintenance applying FRBS. Finally, Section 5 gives conclusions and future suggestions.

2. ARTIFICIAL NEURAL NETWORK STUDIES IN TRANSPORTATION AND MAINTENANCE AREAS

Artificial neural networks (ANNs) are an approach that can be applied in many different areas for estimation. It is generally used in the field of transportation and maintenance for the same purpose. However, there is no paper about the maintenance planning of public transportation vehicles which adopted ANNs method. ANNs have been used to solve problems such as transportation mode selection (Hussain et al. 2017), real-time dynamic transit signal priority optimization (Ghanim and Abu-Lebdeh 2015), determination of bus stop and passenger activity times (Motamed et al. 2012), dynamic public transport passenger flow prediction (Ma et al. 2011). It has been used in many different studies in the field of maintenance such as the evaluation of the renewal process of a mechanism in the maintenance system (Duer 2011), condition-based estimated maintenance (Krenek et al. 2016), anomaly in energy consumption for condition-based maintenance in compressed air generation systems (Santolamazza, Cesarotti, and Introna 2018), estimating tractor repair and maintenance costs (Rohani, Abbaspour-Fard, and Abdolahpour 2011). In this study, it is aimed to determine the behavior of the rule-based system by estimating it with ANNs approach when situations that have not been encountered before in the case of failures. With this study, ANNs have been used for the first time in the maintenance applications of public transport vehicles. In this respect, we believe that our paper will be a prominent study for the combination of application method and area.

3. ESTIMATION OF RULES NOT INCLUDED IN THE RULE-BASED SYSTEM

An FRBS has been created for determining the maintenance policy of the BRT system used in Istanbul in the study of Erdogan (2018) (Erdoğan 2018). In that paper, eight inputs named as Failure Frequency (AYS), the period in which the vehicle is in use (AKD), Vehicle Age (AY), Importance level of failure (ADT), Failure Cost (AML), Vehicle Reliability (GUV), Time After Previous Maintenance (BUGS), Driver Ability (SY) and four outputs Continue to Use (KDE), Take the Vehicle to Service at a Convenient Time (UZB), Take the Vehicle to Service in Urgently (ABA), Remove vehicle from use(AKK) had been identified to be used in the FRBS. Table 1 shows the levels of the inputs with the abbreviations used and Table 2 shows the details for outputs.

Table 1. Levels of inputs

Input	Levels
Failure Frequency (AYS)	Low, Middle, High, Higher, Highest
The period in which the vehicle is in use (AKD)	Summer, Winter
Vehicle Age (AY)	Young, Middle, Old
Importance level of failure (ADT)	Unimportant, Medium Important, High Important
Failure Cost (AML)	Low, Middle, High
Vehicle Reliability (GUV)	Low, Middle, High, Higher, Highest
Time After Previous Maintenance (BUGS)	Short, Middle, Long
Driver Ability (SY)	Low, Good, Middle, Experienced, Professional

Table 2. Levels of outputs

Output	Explanation
KDE	Continue to Use
UZB	Take the Vehicle to Service at a Convenient Time
ABA	Take the Vehicle to Service Urgently
AKK	Remove vehicle from use

Constructing an FRBS for maintenance planning of the metrobus was begun by identifying membership functions for relevant inputs and outputs (Erdoğan 2018). Then, 75 rules were determined with the information obtained from the experts and the proposed DSS was established, in which the vehicle failures in the metrobuses were observed instantly, to organize the maintenance activities better (Erdoğan 2018). At this point, we handled the problem that users of the proposed fuzzy rule-based DSS may want to update rules over time or run and test the system with different rules. Estimating the new rules is an approach that can be applied at this stage. There are 75 rules in the current FRBS; but given the different levels of the eight inputs, a total of 20250 situations can occur. By estimating the maintenance decisions that will arise with different combinations of inputs, the consequences of these different situations that are not in the rule base can be revealed and added to the FRBS. For this aim, we use the ANNs method to estimate the cases that are not in the proposed FRBS by (Erdoğan 2018). The estimation is performed by applying ANNs in the data mining software WEKA.

3.1. Artificial Neural Networks

Artificial neural networks (ANNs) are an information processing system that is inspired by the structure and function of biological neural networks and learns from examples (Kumar, Nigam, and Kumar 2014). ANNs are known as “universal approximators” and “computational models” with specific features such as learning and adapting, organizing or generalizing data (Kiranyaz et al. 2009). What makes the neural network more flexible and powerful is its ability to learn from examples (Kumar, Nigam, and Kumar 2014). The problem-solving parts of these systems are the process elements called neurons. An ANN associated with these elements is designed and a learning algorithm is implemented to train the network. ANNs usually appear as a model with different number of computational elements that work like biological neurons represented by the “n” layer and where these computational elements between the layers form intense connections (Gunerı and Gumus 2008). Multilayer Perceptron (MLP) is the most prevalent neural network model consisting of sequential linear transformations followed by processing with nonlinear activation functions (Avci and Yildirim 2006). The network consists of a series of sensory units (source nodes) that make up the input layer, one or more hidden layers of compute nodes, and an output layer (Gumus, A. T.; Gunerı 2009). Each layer calculates the activation function of a weighted sum of the inputs of the layer (Gumus, A. T.; Gunerı 2009). With the discovery and widespread use of multi-layered neural network training in the 1980s, it was made possible to apply to neural networks as a tool to solve many different problems. Several successful applications of ANNs appear in various fields of mathematics, engineering, medicine, economics, philosophy, economics, finance, meteorology, psychology and neurology (Kialashaki and Reisel 2014). Figure 1 shows the neuron model as an example.

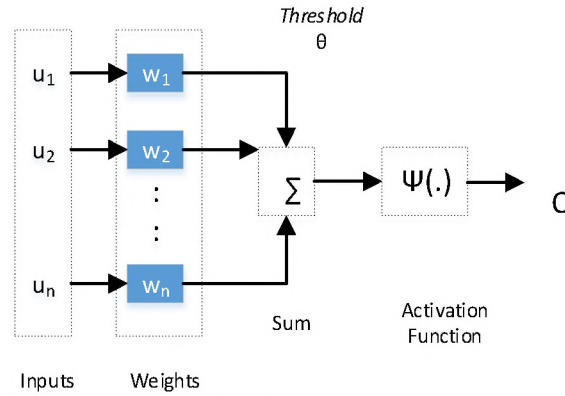


Figure 1. An example of a neuron structure

$$S = w_1u_1 + w_2u_2 + \dots + w_nu_n - \theta = \sum_{i=1}^n w_iu_i - \theta \quad (1)$$

$$o = \psi(S) \quad (2)$$

4. APPLICATION

The FRBS created in the decision-making process regarding the maintenance planning of the metrobus vehicles has 75 rules for 75 different situations. These are the cases where the vehicles have experienced before. However, combinations of inputs other than those previously experienced may also occur in the daily activities of vehicles. These unexperienced combinations may also be desired to be added to the rule-based system. In this study, estimation is made for conditions that may occur out of the determined rules using ANNs approach. WEKA software is used in the estimation process.

WEKA is a java language program developed by Waikato University in New Zealand for use in data mining. In this program, data mining operations such as classification, clustering and association analysis can be performed and pre-processing of data can be performed (Şeker 2015). WEKA is a software that includes machine learning algorithms and data preprocessing tools. This allows quickly to try existing methods in new data sets. With this program, input data is prepared, learning schemes are evaluated statistically, input data and learning outcomes can be visualized. It includes a variety of pre-processing tools as well as many learning algorithms (Witten, Frank, and Hall 2011).

After transferring the rules to WEKA, the ANNs approach is applied to the data by selecting the MultiLayerPerceptron function from the classification tab. WEKA automatically creates a network structure after this selection. Figure 2 shows the network structure visualized by the program.

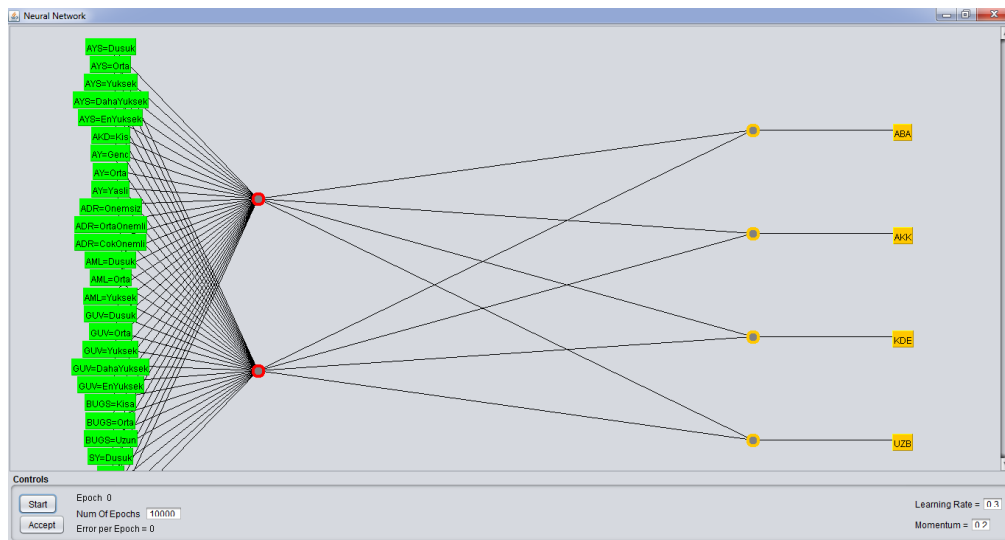


Figure 2. ANNs design created with WEKA program

In order to optimize the ANNs parameters such as learning coefficient, momentum, epoch and number of hidden layers, the grid search algorithm was used. It has been decided to use values for parameters at the highest accuracy degree by increasing or decreasing the related parameters by 0.1 and finally the best values are obtained. The parameters used for the ANNs model are determined as 0.3 for the learning coefficient, 0.2 for the momentum, 0.2 for the epoch and 2 for the hidden layers. The results of the model are obtained as shown in Figure 3.

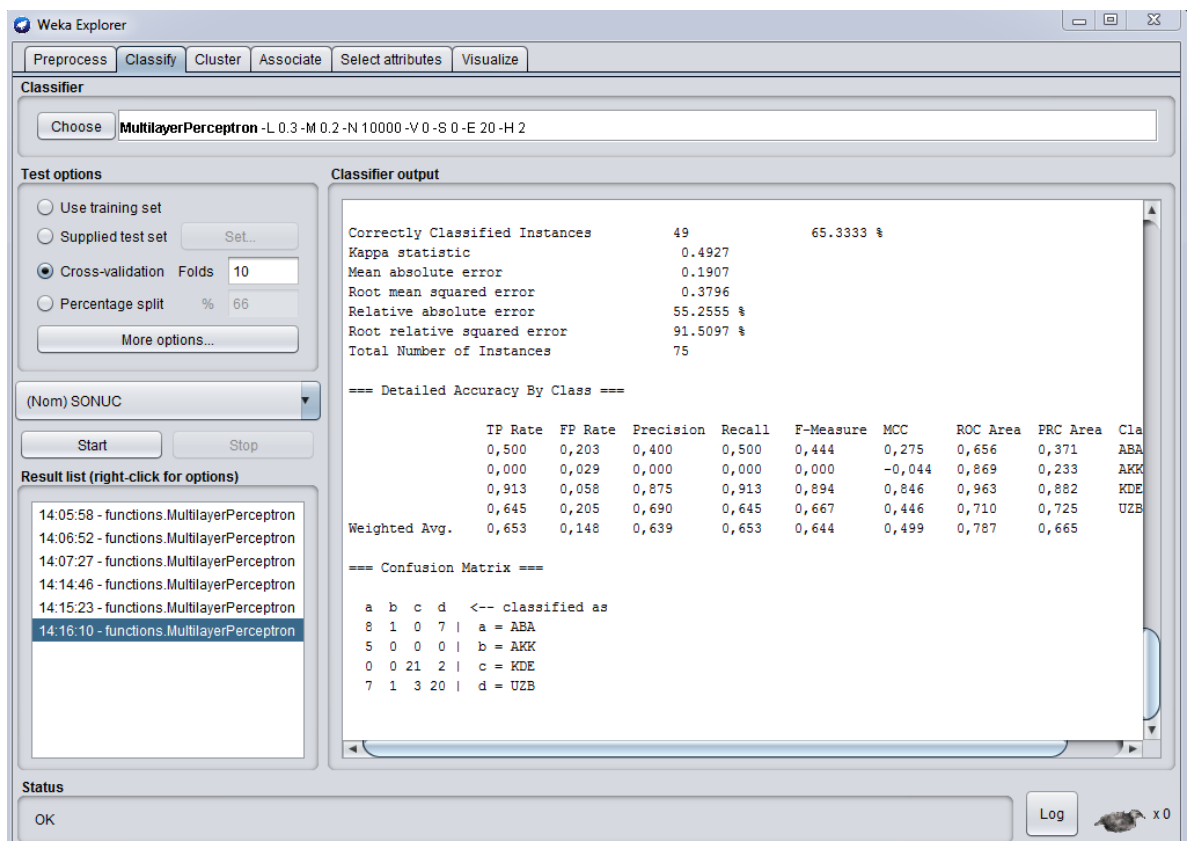


Figure 3. ANNs Results on WEKA Screen

Figure 3 shows the ANNs results with a success rate of 65.3%. Totally, 49 of the 75 data are classified as correct. The model is able to identify samples belonging to all classes. The maximum number of correct

classification is made for 'KDE' output. The output with the lowest rate of correct classification is determined for "AKK", that is, the decision to remove the vehicle from use.

At this point, it can be deduced that some attributes may not have an impact on the classification process and the process of eliminating some of the attributes can be performed to increase the degree of accuracy. Thus, these attributes can be extracted from the data before the classification. One way to measure whether such an attribute is included in the data has an impact on the classification is to create a decision tree. For this aim, a decision tree is created by WEKA to examine whether there is any attribute that has no impact on the classification.

The algorithms used to create a decision tree in the literature are ID3, C4.5, C5.0 and CART. Besides, the J48 algorithm that is developed by the WEKA project team and used to create decision trees, is an open-source Java implementation of the C4.5 algorithm (Bhargava et al. 2018; Yadav and Chandel 2015). The J48 algorithm is applied with the WEKA software to select the input parameters of the ANNs model. The J48 algorithm helps create easy-to-understand models and uses categorical and continuous values (Aljawarneh, Yassein, and Aljundi 2019). J48 creates decision trees from the training dataset, taking advantage of the fact that every feature of the data can be used to make a decision by dividing it into smaller subsets (Bhargava et al. 2018). The algorithm offers a method, known as imputation, identifies missing values according to the existing values and allows the problem of missing values to be solved (Aljawarneh, Yassein, and Aljundi 2019). It also provides greedy method and a tree pruning that helps build small trees and prevent data from over-fitting (Aljawarneh, Yassein, and Aljundi 2019). For all reasons, the J48 algorithm which is also frequently used in the literature is used to create the decision tree. Figure 4 shows the decision tree that is obtained.

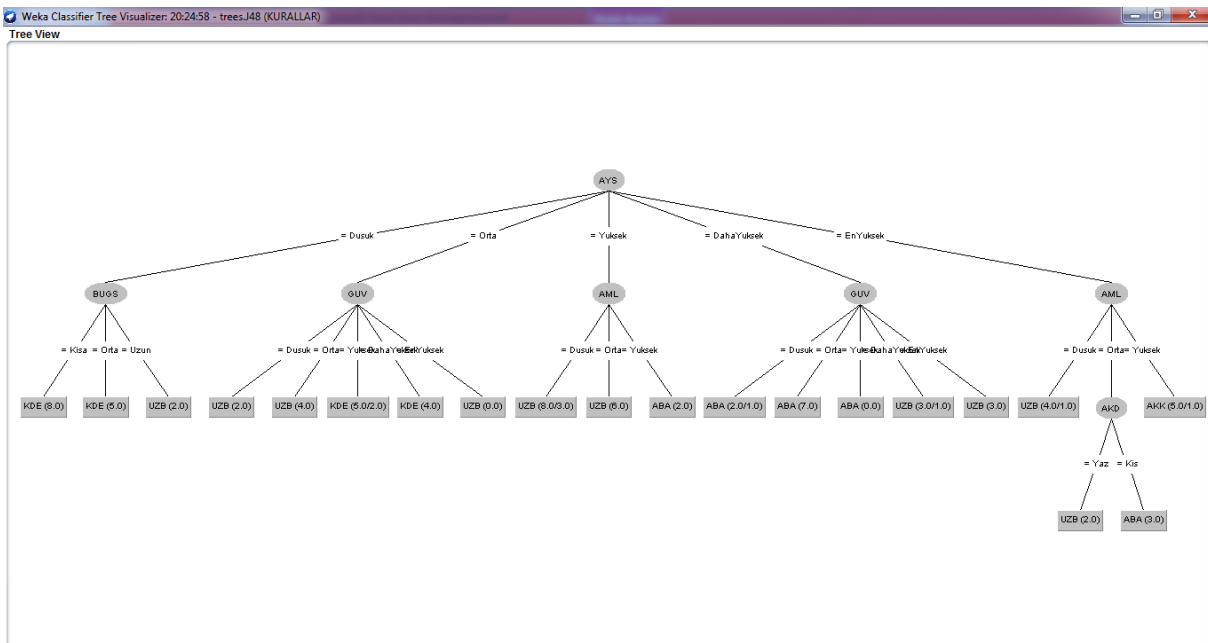


Figure 4. Decision tree for determining the inputs to be used in ANNs

With the decision tree obtained through the program, not all attributes are found to be effective in the classification. The attributes such as vehicle age, importance level of failure and driver ability are inputs that are not included in the classification tree created by WEKA. By subtracting these inputs, a reclassification is performed and the results in Figure 5 below are obtained.

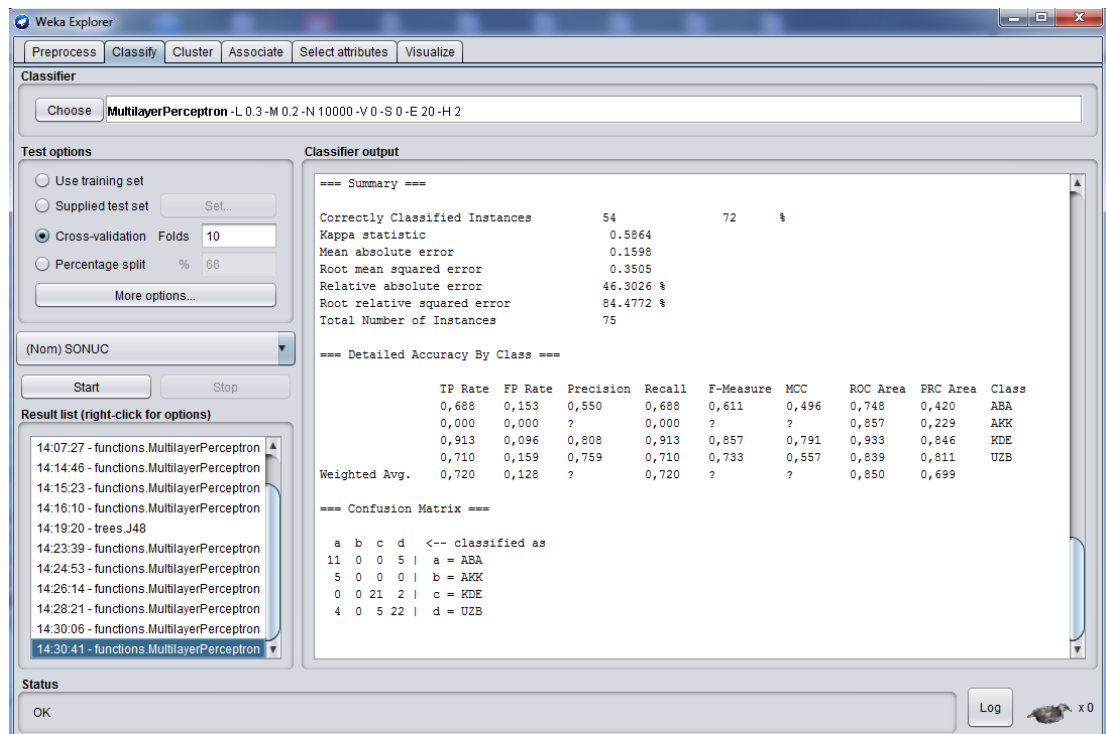


Figure 5. Revised ANNs results

As a result of the classification repeated with the reduced attributes, a success with 72% has been achieved. That means the use of this revised data set for predicting new rules will yield more accurate results. Thus, the estimation process is handled with these revised data. After this step, the estimation of the situations that are not found among the rules is performed. For this purpose, 10 new situations which are not included in the rules are defined as randomly. These new situations which are the combinations of the determined inputs with different levels are shown in Table 3:

Table 3. New Rules Table

Rule/ Result	AYS	AKD	AML	GÜV	BUGS	Output
1	Highest	Winter	Low	Low	Long	?
2	Highest	Summer	High	Low	Short	?
3	Higher	Winter	High	Highest	Long	?
4	Higher	Summer	Low	Higher	Short	?
5	High	Winter	High	Higher	Short	?
6	High	Summer	High	Low	Long	?
7	Middle	Winter	Middle	Middle	Middle	?
8	Middle	Summer	Low	Low	Long	?
9	Low	Winter	High	Low	Long	?
10	Low	Summer	High	High	Short	?

Estimations for these 10 cases that are not in the FRBS by using the ANNs approach in the WEKA program are as shown in Figure 6.

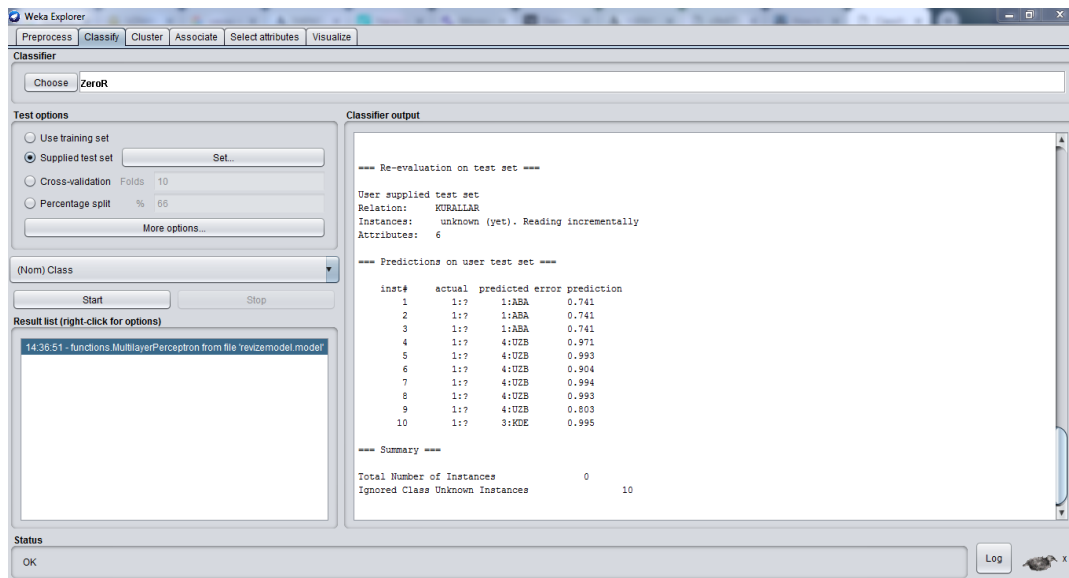


Figure 6. Estimates for situations not found in the rule-based system

As seen in Figure 6, the program proposed to action of taking the vehicle to service at a convenient time for six cases, estimated that taking the vehicle to service urgently for three cases, and presented that continue of use of the vehicle for one case. Estimation was easily made with the help of ANNs over the FRBS proposed for all kinds of situations that not encountered by metrobus before.

With this study, it is the first time that the estimation process is conducted for the maintenance planning of public transportation vehicles and ANNs, which is the method adopted along with the paper, has proven to be applicable in this area. The use of the estimation approach on maintenance planning of public transport is also encouraged. Due to novelty in this paper, it can be said that this study is a leading paper for researchers and practitioners who want to study in this area.

5. CONCLUSION AND FUTURE SUGGESTION

Planning of maintenance activities efficiently for public transport vehicles is an important issue that needs to be addressed especially for crowded cities in which public transport is used intensively. The most efficient way of planning maintenance activities in public transport vehicles requires multi-faceted analysis and in this sense, the rule-based systems are one of the methods that can be used in the maintenance applications. Therefore, we claim that FRBS proposed in this paper can be used effectively in the maintenance analysis of public transport systems.

In the fuzzy rule-based maintenance system created for BRT vehicles by (Erdoğan 2018), 75 rules have been created for different levels of inputs and a DSS has been established on which maintenance actions should be taken depending on the failures in the vehicles. Except for specified situations, which means determined rules, different situations that occur in FRBS can also be included thereafter. At this point, ANNs can be used to make predictions of the results of new rules as in this study. In this paper, it is aimed to estimate the rules of a fuzzy rule-based maintenance system created within contains 75 rules. For this purpose, ANNs application is carried out in WEKA program and rules which are not in FRBS are estimated. For this aim, ten cases randomly determined and the estimation procedure is performed to reveal the results of them. As a result of the estimation made with all qualitative inputs of FRBS, an approach has been developed to provide more accurate results for the proposed FRBS. Rule estimation for this system is aimed to increase the precision and flexibility of maintenance procedures. It has been shown that ANNs can be used effectively for the analysis of rules and conditions that are not included in the current rule-based maintenance system.

In future studies, the estimation can be performed by using different methods and the validity of the method can be analyzed by comparing with real-life results.

6. REFERENCES

- Aljawarneh, Shadi, Muneer Bani Yassein, and Mohammed Aljundi. 2019. "An Enhanced J48 Classification Algorithm for the Anomaly Intrusion Detection Systems." *Cluster Computing* 22(5): 10549–65. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-017-1109-8> (June 22, 2020).
- Avci, Mutlu, and Tulay Yildirim. 2006. "Neural Network Based MOS Transistor Geometry Decision for TSMC 0.18 μ Process Technology." In Springer, Berlin, Heidelberg, 615–22. https://link.springer.com/10.1007/11758549_84 (June 24, 2019).
- Bhargava, Neeraj, Sakshi Sharma, Renuka Purohit, and Pramod Singh Rathore. 2018. "Prediction of Recurrence Cancer Using J48 Algorithm." In Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2017, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 386–90.
- Erdoğan, M. 2018. "The Recommendation of a Decision Support System for Maintenance Management: An Application for the Public Transportation Process." Yıldız Technical University. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>.
- Gumus, A. T.; Guneri, A. F. 2009. "A Neural Network Based Demand Forecasting System For Two-Echelon Supply Chains." In 13th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, .
- Guneri, Ali Fuat, and Alev Taskin Gumus. 2008. "The Usage of Artificial Neural Networks For Finite Capacity Planning." *International Journal of Industrial Engineering* 15(1): 16–25. <http://journals.sfu.ca/ijietap/index.php/ijie/article/viewFile/58/30> (December 2, 2018).
- Kialashaki, Arash, and John R. Reisel. 2014. "Development and Validation of Artificial Neural Network Models of the Energy Demand in the Industrial Sector of the United States." *Energy* 76: 749–60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214010263> (December 2, 2018).
- Kiranyaz, Serkan, Turker Ince, Alper Yildirim, and Moncef Gabbouj. 2009. "Evolutionary Artificial Neural Networks by Multi-Dimensional Particle Swarm Optimization." *Neural Networks* 22(10): 1448–62. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608009001038> (December 2, 2018).
- Kumar, Paras, S.P. Nigam, and Narotam Kumar. 2014. "Vehicular Traffic Noise Modeling Using Artificial Neural Network Approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 40: 111–22. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X14000102> (December 2, 2018).
- Şeker, Şadi Evren. 2015. *Weka İle Veri Madenciliği*. İstanbul: Bilgisayar Kavramları Yayınları.
- Witten, I. H. (Ian H.), Eibe Frank, and Mark A. (Mark Andrew) Hall. 2011. *Data Mining : Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann.
- Yadav, Amit Kumar, and S. S. Chandel. 2015. "Solar Energy Potential Assessment of Western Himalayan Indian State of Himachal Pradesh Using J48 Algorithm of WEKA in ANN Based Prediction Model." *Renewable Energy* 75: 675–93.



KISIT PROGRAMLAMA VE HEDEF PROGRAMLAMA ENTEGRASYONU İLE VARDİYA ÇİZELGELEMESİ: HİDROELEKTRİK SANTRAL UYGULAMASI

¹Evrencan ÖZCAN , ²Hacı Mehmet ALAKAŞ , ³Ayşe YELEK , ⁴Tamer EREN 

^{1,2,3,4} Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, TÜRKİYE

¹evrencan.ozcan@kku.edu.tr, ²hmalagas@kku.edu.tr, ³ayse_yelek@hotmail.com, ⁴teren@kku.edu.tr

(Geliş/Received: 10.07.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.08.2020)

ÖZ: Toplumsal hayatın gereksinim duyduğu enerjinin kesintisiz, güvenilir, zamanında, temiz ve ekonomik yollarla üretilmesi ve en uygun fiyatlarla arz edilmesi olarak tanımlanan sürdürülebilir enerji arzı, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için büyük önem taşımaktadır. Dünya enerji karışımındaki yaklaşık beşte birlik payı ile en gelişmiş yenilebilir enerji teknolojisi olan hidroelektrik santraller ise, sürdürülebilir enerji arzının tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Hidroelektrik santrallerde tüm elektrik üretim tesislerinde olduğu gibi vardiyalı bir çalışma programı bulunmaktadır. Bu sürekli üretim tesislerinde gerçekleştirilecek olan uzun süreli arızaların engellenmesini ve üretimin kesintisiz bir şekilde devam edebilmesini sağlayan personellerin işletmenin istekleri ve yasal yükümlülükler doğrultusunda analitik olarak çizelgelenmesi önemli bir husustur. Buradan hareketle bu çalışmada, bir hidroelektrik santralde çalışan personellerin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için kısıt programlama ve hedef programlamanın entegre edildiği model literatürde ilk defa önerilmiştir. Gerçek veriler ile oluşturulan bu entegre modelin çözümü neticesinde 3 vardiyada çalışan 28 personel için 31 günlük optimal bir çizelge elde edilmiştir. Elde edilen yeni çizelgede vardiya ekipleri arasında adaletli ve dengeli bir atama yapılarak işletmenin istekleri ve personelin memnuniyeti sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Vardiya çizelgeleme, kısıt programlama, hedef programlama, hidroelektrik santraller

Shift Scheduling with Constraint Programming and Goal Programming Integration: Hydroelectric Power Plant Case

ABSTRACT: Sustainable energy supply, which is defined as the production of the energy required by social life through uninterrupted, reliable, timely, clean and economical ways and its supply at the most affordable prices, is of great importance for developed and developing countries. Hydroelectric power plants which is the most advanced renewable energy technology with approximately 20% share of the world energy mix has critical importance for the realization of sustainable energy supply in Turkey as well as all over the world. Hydroelectric power plants have a shift work schedule as in all electricity generation power plants. It is important that scheduling the personnel, who ensure to keep from long-term failures that can occur and to continue uninterrupted generation in these continuous production facilities analytically in line with the demands of the company and legal obligations. Starting from this, in this study, the problem of scheduling of personnel working in a hydroelectric power plant has been addressed. For the solution of the problem, the model in which constraint programming and goal programming are integrated has been proposed for the first time in the literature. As a result of the solution of this integrated model created with real data, an optimal 31-day schedule was obtained for 28 staff working in 3 shifts. The demands of the company and the satisfaction of the personnel were ensured by making a fair and balanced appointment among the shift teams in the new schedule.

Key Words: Shift scheduling, constraint programming, goal programming, hydroelectric power plants

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınması için en önemli girdilerden biridir. Sanayi devrimi ile başlayan enerji talebi artan nüfus, ekonomik gelişme ve gelişen yaşam standartlarına bağlı olarak her geçen gün artış göstermektedir (Yılmaz, 2012). Toplumun ve ekonominin gereksinim duyduğu enerjinin kesintisiz, güvenilir, zamanında, temiz ve ucuz yollarla temin edilmesi ve en uygun fiyatlarla sağlanabilmesi olarak tanımlanan enerji arz güvenliği açısından enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler için büyük önem taşımaktadır (Pamir, 2005).

Fosil yakıt rezervleri azalırken, bir yandan da dünya nüfusunun hızla artışı, ülkeleri yeni ve sürdürülebilir enerji politikaları geliştirmeye zorlamaktadır. Bu amaçla ülkeler çevreye duyarlı ve sürdürülebilir olması sebebiyle yenilenebilir enerjiye yatırımlarını artırmışlardır. Dünya genelinde yenilenebilir enerjinin önemi anlaşılrsa da enerji talebinin büyük kısmı henüz diğer kaynaklardan elde edilmektedir. Türkiye’de de son yıllarda yenilenebilir enerji yatırımları hız kazanmıştır. Türkiye’nin mevcut enerji ihtiyacının yaklaşık %30’u yenilenebilir kaynaklardan elde edilmektedir. Mevcut yenilenebilir kaynakların dörtte üçünü oluşturan kaynak ise hidroelektriktir. Hidroelektrik kaynaklar geçmişten bugüne önemini yitirmemiş ve her zaman ülke ekonomisine katkı sağlamıştır. Hidroelektrik santrallerden elektrik üretilmesi amacıyla kullanılan en büyük kaynak akarsu yataklarına kurulan barajlardır. Bu barajlara kurulan santraller aracılığıyla elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir.

Doğaya en az zarar veren enerji üretim yöntemlerinden biri hidroelektrik santrallerdir. Hidroelektrik santrallerde üretim esnasında doğaya zararlı atıklar oluşmamakla birlikte, fosil yakıt kullanan enerji santrallerine göre sera gazı salımı (karbon dioksit-CO₂) bu tesislerde oldukça düşük seyretmektedir. Bu sebeple jeotermal, rüzgar ve güneş gibi doğal kaynaklarla birlikte son yıllarda yenilenebilir enerjinin en yaygın olarak kullanılan şeklidir (Ürker ve Çobanoğlu, 2017). Dünya teorik hidroelektrik potansiyelinin %1’ini, Avrupa ekonomik potansiyelinin %16’sını Türkiye’deki hidroelektrik potansiyeli oluşturmaktadır. 2018 Haziran ayı sonu itibarıyla, işletmede bulunan 27.912 MW’lık kurulu güce sahip 636 adet hidroelektrik santral Türkiye toplam kurulu gücünün %32’sine karşılık gelmektedir (TC Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019). Enerji santrallerinin Endüstri 4.0 ve gelişen teknolojinin gereklilikleri doğrultusunda insan gücüne bağımlılığı azalarak tam otomasyon çalışan üretim tesislerine dönüşmesi gerekmektedir. Fakat günümüzde birçok enerji santrali insan gücünü temel alan bir üretim gerçekleştirilmektedir. Enerji santrallerinde sürekli üretim yapan tüm üretim tesislerinde olduğu gibi iş gücünün sürekliliğini sağlamak amacıyla vardiyalı bir çalışma sistemi uygulanmaktadır. Vardiya personelinin yorgunluk, konsantrasyon eksikliği, deneyim, adil çalışma düzenine bağlı olarak motivasyon eksikliği nedeniyle hata yapma olasılığı yüksektir (Özder vd., 2019). Bu sebeple enerji sistemlerinde uygun bir çizelge oluşturulması işletme ve personel için büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın uygulama alanı olan hidroelektrik santrallerde diğer enerji santrallerinde olduğu gibi çalışan personeller üretimin sürekliliğini sağlamak için vardiyalı olarak çalışmaktadır. Hidroelektrik santral personellerinin oluşabilecek arızalarda yapacağı müdahaleler üretimin aksamasını engellemektedir. Bu sebeple personellerin doğru bir vardiya planı ile çizelgelenmesi işletmenin talepleri zamanında karşılayabilmesini ve maddi kayıpların önüne geçilmesini sağlamaktadır. Personel çizelgeleme, çizelgeleme problemleri arasında çalışma alanı en geniş problem türüdür. Personel çizelgeleme tüm personel grupları için uygulanabilir. Bu sebeple literatürde birçok farklı sektörde yapılmış çizelgeleme çalışması bulunmaktadır. Yapılan literatür araştırmasına göre ulaşım, sağlık gibi sektörlerde yapılan çalışmaların aksine enerji sektöründe henüz fazla çalışma bulunmamaktadır.

Bard vd. (2003), Amerika Birleşik Devletleri Posta Servisi’nin personel çizelgeleme probleminde, Yunes vd. (2005), Brezilya’daki bir otobüs firmasında çalışan şoförlerin çizelgelenmesinde, Lezaun vd. (2006), demiryolu sürücülerinin personel çizelgelenmesinde, Topaloğlu vd. (2006), hastanenin acil servisinde çalışan asistanların kıdem seviyelerine göre çizelgelenmesinde, Günther ve Nissen (2010), bir nakliye firmasının çalışanlarının çizelgelenmesinde çalışmışlardır. Fırat ve Hurkens (2012), karışık tamsayı programlama ile, Eren vd. (2017), hedef programlama (HP) yöntemi ile çizelgeleme problemi için model oluşturmuşlardır.

Vardiya çizelgeleme problemi üzerinde yapılan temel çalışmalar ise şunlardır: Sungur (2008), çizelgeleme problemlerinde ihtiyaç duyulan işgücü sayılarının kesin olarak bilinmediği durumu incelemiştir. Yağcıoğlu vd. (2016), kredi ve yurtlar kurumundaki, Ciritoğlu vd. (2017), Kırıkkale üniversitesindeki, Demirel vd. (2018), metro istasyonlarındaki güvenlik görevlilerinin vardiya çizelgelemesi problemini ele almıştır. Louly (2013), telekomünikasyon merkezinde çalışan personellerin, Varlı ve Eren (2016), bir fabrikada çalışan şeflerin, Bedir vd. (2017), ergonomik koşulları dikkate alarak, Yelek vd. (2018), kütüphanede kısmi zamanlı iki vardiya çalışan 40 öğrencinin isteklerin dikkate alındığı bir vardiya çizelgesi oluşturmuşlardır. Literatürde personel çizelgeleme problemlerinin çözümü için HP, doğrusal programlama, dinamik programlama ve tamsayı programlama gibi matematiksel programlama yöntemlerinden sıklıkla faydalanılmıştır. Kuyruk teorisi, kısıt programlama (KP) ve simülasyon ise personel çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan diğer çözüm yöntemleridir (Özder vd., 2019).

KP yöntemi son yıllarda literatürde araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Çeşitli alanlarda kullanılmaya başlanılan KP yönteminin çizelgeleme alanında bir örnek Laporte ve Pesant (2004)'a aittir. Araştırmacılar, literatürdeki diğer algoritmalarından daha geniş bir çeşitlilikteki kısıtlamaları içeren yeni bir KP algoritması geliştirilmiştir. Aslan (2010), büyük ölçekli bir enerji yönetimi probleminin çözümü için çalışmıştır. Demiryolu çizelgenmesinde Rodriguez (2007), Paris'teki bir kavşaktan geçen trenlerin rotalanması ve programlanması için, Pour vd. (2018), Danimarka demiryolu sistemindeki önleyici sinyal bakım ekibi çizelgeleme problemi için KP yönteminden yararlanmışlardır. Sağlık sektöründe Trilling vd. (2006), hemşire çizelgeleme problemini, Gür vd. (2019), ise ameliyathane çizelgenmesi problemini KP yöntemi ile ele almışlardır. De Silva (2001), otobüs şoförü çizelgeleme probleminin çözümünde, Goel vd. (2015), sıvılaştırılmış doğalgaz taşıyan gemi çizelgelemesi ve envanter yönetiminde KP yöntemi ile çalışmıştır. Ayrıca, Alağas vd. (2013), Alağas vd. (2016) ve Pınarbaşı (2015) çalışmalarında KP ile montaj hatlarının dengelenmesi üzerine çalışmışlardır.

Literatürde enerji sistemleri ile ilgili personel çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde; Eitzen vd. (2004), Avustralya'daki bir enerji santralinde farklı beceri ve yeteneklere sahip personellerin çizelgenmesi problemini ele almışlardır. Oluşturdukları doğrusal programlama modeli için sundukları üç çözüm yönteminden ikisi olan azaltılmış sütun altkütmesi ve sütun genişletme yöntemlerinin, optimum çözümleri garanti etmemekle birlikte, makul bir sürede kabul edilebilir çözümler sağlayabildiğini göstermişlerdir. Üçüncü yöntem olan sütun üretimi ile maliyet optimizasyonunun sağlandığını fakat çözüm süresinin diğerlerine göre uzun olduğu sonucuna varmışlardır. Lilly vd. (2007), Nijerya'da bulunan bir elektrik üretim şirketinde bakım işlerinin çizelgenmesini ele almışlardır. Gaz türbinlerinin bakımı için normalde 5 günlük olan periyodun 4 güne indirilmesini ve bu periyot değişiminin işletmeye olan katkısını incelemişlerdir. Sonuç olarak işgücü sayısının azaltılarak işçilik maliyetinde %10 tasarruf sağlamış ve yüksek verimlilik ile enerji talebinin karşılanabildiğini ortaya koymuşlardır. Özder vd. (2019), doğalgaz kombine çevrim santrallerinde HP yöntemini analitik ağ süreci yöntemi ile entegre ederek personel çizelgeleme için kullanmışlardır. Analitik ağ süreci ile dokuz kriter dikkate alınarak işçilerin yeteneklerinin ağırlıklandırılmış, elde edilen ağırlıkları oluşturulan matematiksel modeldeki kısıtlarda kullanılmıştır. Çalışma sonucunda 80 personelin 30 gün boyunca üç vardiyada yeteneklerine göre çizelgenmesi yapılmış, işletmenin toplam kârı %92,45 artmıştır. Shuib ve Kamarudin (2019), Malezya'nın en büyük enerji santralindeki işçilerin vardiya çizelgelemesi problemi üzerine çalışmıştır. Problemin çözümü için tamsayı HP metodundan yararlanmışlardır. Çalışmada elektrik üretim santralinin seçilen bir departmanında 43 işçinin 28 gün boyunca üç vardiyada (sabah, akşam ve gece vardiyaları) çalıştığı ve bekleme ve dinlenme günlerinin dikkate alındığı bir çizelge oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda personel memnuniyeti %43,02'den % 80,23'e yükselmiştir.

Yapılan incelemeler doğrultusunda hidroelektrik santrallerde personel çizelgeleme problemini ele alan iki çalışma olduğu görülmektedir. Özcan vd. (2017), çalışmalarında HP yöntemi ile vardiya çizelgeleme problemine çözüm geliştirmişlerdir. Oluşturulan çizelge sonucunda ay sonu yapılan analiz ile operatör hatalarından kaynaklı yaşanan üretim duruşunun azaltılarak %91'lik bir iyileşmenin sağlandığı görülmüştür. Bedir (2017), hidroelektrik santrallerde görevli personelin çizelgenmesi için

AHP, PROMETHEE ve HP yöntemlerinden yararlanmıştır. Personellerin vardiyalara yetkinlikleri dikkate alınmıştır. İncelenen literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, personel çizelgeleme çalışmalarının fazla olmadığı bir sektör olan enerji sektöründe çalışan personellerin vardiya çizelgesi problemi ele alınmıştır. Bir hidroelektrik santralde yapılan bu çalışmada, personeller görev ve yetkinlikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Problemin çözümünde ise literatürde çokça kullanılan diğer matematiksel programlama yöntemlerinin yerine KP yönteminden yararlanılmıştır. KP-HP entegrasyonu ile bir model önerilmiştir. Modelde ağırlıklı HP yönteminden yararlanılmış olup ağırlıklar eşit kabul edilmiştir.

Bu çalışmada, personel hatalarından kaynaklanan üretim duruş maliyetlerini azaltmak amacıyla, işletmenin planlama sürecinde sağlaması gereken yasal zorunluluklar ve işletme esasları dikkate alınarak personellerin vardiyalara adil bir şekilde atanması amaçlanmıştır. Vardiya çizelgesinin oluşturulabilmesi için literatürde ilk kez bir hidroelektrik santralde KP-HP entegrasyonu ile sistem modellenmiştir. Oluşturulan KP modeli ILOG CPLEX optimizasyon programında yazılmış ve sonuçları elde edilmiştir.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışma hakkında bilgi verilmiş ve literatürdeki çalışmalar sunulmuştur. İkinci bölümde, vardiya çizelgeleme problemi tanımlanmış, çalışmanın yöntemi olan KP ve HP anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, ele alınan gerçek problem tanımlanmış ve modellenmiş, elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Çalışmanın son bölümde ise, sonuçlar değerlendirilerek çalışmanın literatüre olan katkısı tartışılmıştır.

MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Vardiya çizelgesi işgücü çizelgesinin özel bir halidir ve çalışılan günün seyrine göre talep değişimlerini karşılamak istenmektedir. Bir çalışma gününde çalışanların yetki ve görevleri doğrultusunda çalışacağı vardiyanın, mola ve izinlerinin belirlenmesi vardiya çizelgeleme problemidir. Çalışmaya başlama saatleri ve dinlenme süreleri, vardiya türleri, uzunluğu gibi işletme tarafından belirlenen vardiya özelliklerine uygun olarak çalışanlar atanırlar. Vardiya çizelgeleme problemlerinden vardiyaya atanan çalışanların sayıları ve izin, mola süreleri verilir (Aykin, 1996). Vardiya çalışması ,güvenlik (Ciritcioğlu vd., 2017), ulaşım (Varlı vd., 2016), turizm (Davras, 2017) ve sağlık (Öztürkoğlu, 2014) gibi hizmet ya da imalatın ekonomik ve kamusal açıdan sürekliliği olan alanlarda sıklıkla çalışılan bir problem türüdür.

Bir kurum ya da kuruluşta aylık, haftalık veya yıllık şekillerde vardiya çizelgesi yapılabilir. Çizelgelerde çalışanları uzman oldukları görevlere atayarak ve bazen de çalışanların özel izin ve istekleri yerine getirilerek adaletli bir vardiya sistemi oluşturulur. Vardiya çizelgeleme, işletmenin yapısına ve sektörüne göre farklılık gösteren maliyet ve iş gücünü minimum düzeyde tutarak maksimum fayda sağlamayı amaçlayan bir çizelgeleme türüdür. Vardiyalı çalışılan iş yerlerinde genellikle sabah, akşam ve gece vardiyası olmak üzere üç vardiya bulunmaktadır (Yüksel, 2004).

Bu çalışmada ele alındığından hidroelektrik santrallerde ise, sürekli talebi karşılamak için üretim kesintisiz olarak yapılmaktadır. Bu sürekli üretimin yapılabilmesi için personellerin vardiya sistemi ile çalışması gerekmektedir. Hidroelektrik santrallerde vardiya çizelgeleme, personelin etkin çalışması ve olabilecek arızaların önüne geçilebilmesi açısından önem taşımaktadır. İşletmenin istekleri ve yasal yükümlülükler doğrultusunda oluşturulacak vardiya çizelgesi personel memnuniyetini artırmakla beraber üretimin devamlılığını sağlamamakta ve verimliliği de arttırmaktadır.

Vardiya çizelgeleme probleminin çözümünde ya sezgisel algoritmalarından, ya matematiksel modellerden ya da ikisinin bir arada kullanıldığı modellerden faydalanılır (Varlı ve Eren, 2016). Bu çalışmada ise, KP-HP entegrasyonu ile vardiya çizelgeleme problemi için bir çözüm önerisinde bulunulmuştur. HP, birden fazla amaca sahip çok amaçlı optimizasyon problemlerini modellemek için kullanılırken, KP kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir algoritmadır. Bu çalışmada ise, KP ve HP yöntemleri entegre edilmiştir. Ele alınan çok amaçlı problem modelleme aşamasında tek amaçlı olarak çözülmüştür. Çözüm sürecinde gerçekleştirilmesi istenilen amaçlar HP

yöntemi ile bir araya getirilmiş, başka bir ifade ile tek bir amaç olarak ifade edilmiş ve KP yöntemi kullanılarak problem modellenmiştir.

Kısıt Programlama (Constraint Programming)

KP, doğrusal programlamanın optimal çözüme ulaşma gücü ile mantıksal bilgisayar programlamanın kolay tanımlanma özelliklerini bir arada kullanan, matematiksel programlamaya alternatif güçlü bir modelleme ve çözüm metodudur. KP genel yapısıyla değişkenlerden, değişkenlerin alabileceği değerleri içeren tanım kümelerinden ve değişkenler arasındaki ilişkileri gösteren kısıt kümesinden oluşur (Alağuş, 2017). Bir problemin KP ile çözülmesi izlenen üç adım bulunmaktadır:

- Karar değişkenlerinin, tanım kümesinin ve karar değişkenlerinden oluşan kısıtların olduğu KP modelinin kurulması gerekmektedir.
- KP modeli bir optimizasyon programında yazılarak bilgisayar ortamına aktarılmalıdır.
- Uygun bir arama stratejisi belirlenerek problem KP algoritması ile çözümlenmelidir.

Bir KP probleminin çözüm algoritmasında iki temel adıma ihtiyaç duyulur: değişken seçimi ve değer seçimi. Değişken seçimi, bir çözüm oluşturmak için arama ağacının herhangi bir dalında hangi değişkenin seçileceği ile ilgilidir. Değer seçimi ise, dal oluşturmak üzere seçilmiş değişkene değer ataması ile ilgilidir (Pınarbaşı, 2015). Bir KP modeli oluşturulurken $\{X, C, D\}$ notasyonları kullanılır.

- X karar değişkeni dizisini göstermektedir ve $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ şeklinde tanımlanır.
- D karar değişkenlerinin alabileceği değerler kümesidir ve $v_i \in D(x_i) \quad i=1, \dots, n$ şekline tanımlanır.
- C ifadesi ise, kısıtları ifade etmektedir ve $C_j = \{c_1, \dots, c_m\}$ olarak tanımlanmaktadır.

Tüm kısıtlar yerine getirilirken karşılık gelen kümelerden tüm değişkenler için değer ataması yapılmalıdır. Ele alınan problem için tüm çözüm alanı $D_1 \times D_2 \times D_3 \dots D_{n-1} \times D_n$ olarak temsil edilir. Çoğu zaman bu problem $H(x_1, \dots, x_n)$ olarak tanımlanan amaç fonksiyonunu da içerir. Genel bir KP yapısı aşağıda gösterilmiştir (Apt, 2003):

$$\begin{aligned} & \text{minimize } H(x_1, \dots, x_n) \\ & \text{subject to} \\ & C_j = \{c_1, \dots, c_m\} \quad \forall j \in \{1, \dots, m\} \\ & x_i \in D_i \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

KP modelinin sonuç verebilmesi için karar değişkenlerinin tanım kümesinde bulunan değerlerden birini alması ve aldığı bu değer için verilen kısıtları sağlaması gerekmektedir. Aramanın bir aşamasında eğer herhangi bir değişkenin tanım kümesi boş küme olursa değişken seçim kurallarına göre yeniden değişken seçimi yapılır ve seçilen bu değişkene tanım kümesi içerisinde değer ataması yapılır. Eğer değer almayan bir değişken yok ise çözüm elde edilir ve arama sonlandırılır (Ünsal, 2013).

KP yöntemi modelleme sürecinde mantıksal kısıtların yazımında kolaylık sağlamaktadır. Aynı zamanda karar değişkenleri sayısal değişkenlerin yanı sıra farklı yapılarda da değerler alabilmektedir. Çözüm süreçlerinde KP yöntemi karar vericilere daha az karar değişkeni sayısı ile model kurabilme olanağı sağlamaktadır. Karar vericiler modelleme aşamasında tanımladıkları çözüm arama algoritmalarını kullanabilmektedir. KP yönteminin bu avantajları göz önünde bulundurularak problemin çözüm sürecinde temel KP modeli önerilmiştir. Bu sayede, literatürde ilk defa vardiya personelinin üretim süreçleri üzerindeki etkisinin büyük olduğu hidroelektrik santrallerde KP-HP entegrasyonu ile bir model önerilmiş ve literatürdeki diğer örneklerle nazaran daha az karar değişkeni tanımlanarak modelleme süreci kolaylaştırılmış ve uygulama sonuçlarında da belirtildiği üzere etkinlik elde edilmiştir.

Hedef Programlama (Goal Programming)

HP, bir karar vericinin birden fazla amacının olduğu durumlarda kullanılan bir matematiksel modelleme yöntemidir. Diğer matematiksel modellerden farkı, aynı anda birden çok amacı sağlatabilen bir yapıya sahip olmasıdır. HP modelinin kullanılabilmesi için en az iki farklı amacı olan bir problemin ele alınmış olması gerekmektedir.

HP yöntemi ilk defa 1955 yılında Charnes ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılmıştır (Charnes ve Cooper, 1955). HP için ilk tanımlama da yine Charnes ve Cooper tarafından yapılmıştır (Charnes ve Cooper, 1961). Lee ve Ignizio'nun çalışmaları HP'nin çalışma alanları ve teknik uygulamaları için yol gösterici olmuştur (Ignizio, 1976; Lee, 1972). Literatürde araştırmacılar tarafından kullanılan üç ayrı HP yöntemi bulunmaktadır. Öncelikli HP ve ağırlıklı HP sıklıkla kullanılmasına rağmen, minmax HP olarak da bilinen Chevyshev HP, daha az yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Gür ve Eren, 2018).

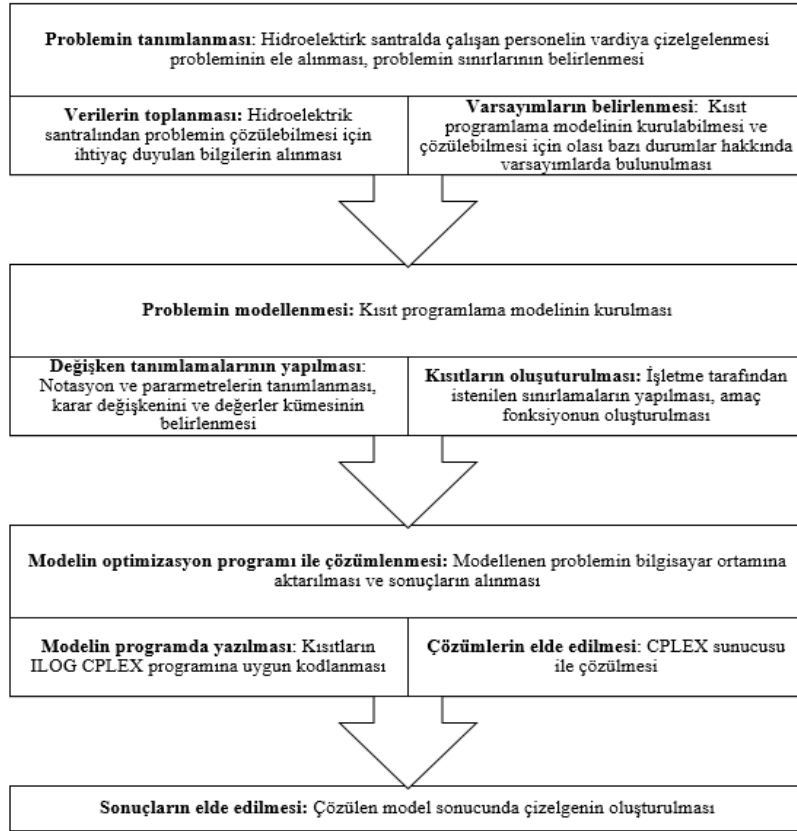
HP modelinde birden çok amacı sağlayabilmek için amaçlar hedef kısıtları olarak tanımlanır ve modelin amaç fonksiyonunda bu hedef kısıtlarındaki sağ taraf değerinden uzaklaşmanın küçüklenmesi sağlanır. Hedef kısıtlarında diğer kısıtlardan farklı olarak negatif ve pozitif sapma değişkenleri bulunmaktadır. HP'de sapma değişkenleri her bir hedef kısıtı için en az bir, en fazla iki tane olmakla beraber genellikle d_i^+ ve d_i^- simgesiyle gösterilir. Bir sapma değişkeni sıfırdan küçük olamamaktadır. Aynı anda bir hedeften hem pozitif hem negatif sapma olması mümkün olmadığı için değişkenlerden biri daima sıfır değerini alır. Hedef kısıtlarına bağlı olarak negatif ve pozitif sapma değişkenleri istenen veya istenmeyen değişken olarak ifade edilebilmektedir. HP'de amaç, fonksiyonun hedeften sapmasını en küçüklemediği için pozitif ve negatif sapma değişkeninin sıfıra oldukça yakın değerler olması beklenmektedir (Ignizio, 1985).

Hedef programlama modelinin gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{array}{ll}
 x_j : j. \text{ Karar değişkeni} & j = 1, \dots, n \\
 d_i^+ : i. \text{ hedeften pozitif sapma değişkeni} & i = 1, \dots, k \\
 d_i^- : i. \text{ hedeften negatif sapma değişkeni} & i = 1, \dots, k \\
 a_{ij} : i. \text{ hedefin } j. \text{ karar değişkeni katsayısı} & i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n \\
 b_i : i. \text{ hedef için istenen değer} & i = 1, \dots, k \\
 \text{Genel gösterimi ise aşağıdaki gibidir:} & \\
 \text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^m (d_i^+ + d_i^-) & \\
 \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j - d_i^+ + d_i^- = b_i & i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, n \\
 x_j, d_i^+, d_i^- \geq 0 &
 \end{array}$$

UYGULAMA (CASE STUDY)

Bu çalışma ile bir hidroelektrik santralde çalışan personellerin vardiya çizelgelerinin KP modeli ile yapılması amaçlanmıştır. Problemin tanımlanmasından uygulamanın sonuçlarının elde edilmesine kadar devam eden süreç uygulama akış şeması (Şekil 1)'de verilmiştir.



Şekil 1. Uygulama akış şeması

Figure 1. Application flow chart

Problemin Tanımlanması (Defining the Problem)

Bu çalışmada, Türkiye’de bulunan bir hidroelektrik santralini işletme personelinin vardiya çizelgeleme problemi ele almıştır. Ele alınan santral 95 Megawatt (MW) kurulu güce sahip bir santraldır. Santral 30 MW, 30MW ve 35MW olmak üzere 3 üniteden meydana gelmektedir. SCADA (Merkezi Kontrol ve Veri Toplama Sistemi) bulunmayan santralde güncel teknolojilerle oluşturulan otomasyon sistemlerinin kullanılmaması sonucu personel ihtiyacı artmaktadır. Söz konusu artıştan dolayı personellerin vardiya planlarının oluşturulmasını zorlaşmaktadır.

Planlamada karşılaşılan problemlerin kaynağı işletme yöneticisinin bazı personelleri sürekli gece vardiyasında çalıştırmasıdır. Vardiya planlarının dengesizliği personel memnuniyeti ve motivasyonunu olumsuz etkilenmektedir. Problemin modelinin oluşturulabilmesi ve çözülebilmesi için olası bazı durumlar hakkında varsayımlar yapılmıştır. Yapılan varsayımlar şunlardır:

- Çizelge 31 gün için yapılacaktır.
- Resmi ve dini tatil günleri ile hafta sonları dikkate alınmayacaktır.
- Personellerin yıllık izinleri dikkate alınmayacaktır.
- Çizelgedeki birinci gün ayın ilk gününü, haftanın ilk günü ise, herhangi bir günü göstermektedir.

365 gün boyunca 24 saat esasına göre durmaksızın üretim yapma hedefi ile kurulan elektrik üretim santrallerinde her gün 3 vardiya şeklinde çalışılmaktadır. Uygulamada ele alınan santralde vardiyalar sabah (08:00-16:00), akşam (16:00-00:00), gece (00:00-08:00) şeklinde planlanmaktadır. Santralde vardiya ekibi 28 personelden oluşmaktadır. Bu personeller 4 farklı kıdem seviyesine sahiptir. Bunlar beş vardiya amiri, dokuz ustabaşı, sekiz usta ve altı usta yardımcısıdır. Sınırlamalar yapılırken santraldeki gereklilikler santral uzmanları tarafından belirlenmiştir. İşletme ve bakım konusunda 10 ila 25 yıl

arasında tecrübeye sahip elektrik mühendisi, elektrik-elektronik mühendisi, makine mühendisi ve endüstri mühendisi unvanına sahip uzmanların ortak görüşü ile kısıtlar belirlenmiştir.

Örneğin, her bir vardiyada en az bir vardiya amiri bulunmak zorundadır. Çünkü mühendislerin çalışmadığı vardiyalarda da santral üretimine devam etmektedir. Özellikle bu vardiyalarda santralin işletme direktiflerine uygun olarak çalışmasını sağlayan en yetkin ve tecrübeli personel bunlardır. Diğer taraftan ustabaşları yetkinlik ve tecrübe seviyesi en yüksek olan teknisyenlerdir. Tüm vardiyalarda bu personeller mühendis ve vardiya amirlerinin yardımcıları pozisyonundadır. Bir ustabaşının üretimle ilgili herhangi bir süreci kontrolü esnasında da başka bir sürece de (herhangi bir ekipmanın tolerans sınırlarına yaklaşması, arızası, diğer işletme personellerinin sevk ve idaresi vb.) müdahale etmesi gerekebileceğinden en az iki kişi olması gerekmektedir. Santralin tüm ünitelerinin çalışması durumunda ise geçmiş tecrübeler ve işletme direktiflerine dayanarak personel sayısı beş kişi ile sınırlandırılmıştır.

Vardiya Çizelgeleme için Kısıt Programlama Modeli (Constraint Programming Model for Shift Scheduling)

Problemin çözülebilmesi için oluşturulan modelin parametreleri, karar değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonu bu bölümde verilmiştir. Problemin notasyon ve parametreleri şunlardır:

N: Santralde çalışan personel sayısı	$N = 28$
M: İlgili aydaki gün sayısı	$M = 31$
K: Vardiya sayısı (1: Sabah, 2: Akşam, 3: Gece, 4: Tatil)	$K=4$
k: vardiya ve tatil indisi	$k = 1, \dots, K$
i=personel indisi	$i = 1, 2, \dots, N$
j=gün indisi	$j = 1, 2, \dots, M$
Problemin karar değişkenleri aşağıda verilmiştir;	
X_{ij} = i. personelin j. gün çalıştığı vardiya değeri	$\forall i, j$
d_{ik}^+ = i. personelin k. vardiyada çalıştığı gün sayısının hedeften pozitif sapması	$\forall i, k$
d_{ik}^- = i. personelin k. vardiyada çalıştığı gün sayısının hedeften negatif sapması	$\forall i, k$

Hedef kısıtı

İşletmedeki uzmanlardan alınan bilgiler doğrultusunda vardiyaların adaletsiz atanmasından dolayı oluşan sorunlar dikkate alınarak hedef belirlenmiştir. Çalışanlar arası vardiyaların eşit ve adil bir şekilde atanmasını sağlamak amacıyla hedef kısıtı oluşturulmuştur. Bu hedef ile çalışanların atandıkları vardiya sayılarının olabildiğince eşit olması sağlanmıştır.

$$\text{count}(X_{ij}, k) + d_{ik}^- - d_{ik}^+ = 8 \quad \forall i, k$$

Kısıtlar

Çalışmada ele alınan kısıtlar uygulamanın ele alındığı santralin belirlediği kanunî ve özel kısıtlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

1.Kısıt: Her gün her vardiya için gerekli personel sayısının atanması kısıtı

$$\text{count}(X_{ij}, k) = 7 \quad k = 1, 2, 3 \quad \forall i, j$$

2.Kısıt: Vardiya amirlerinin her vardiyada en az bir, en fazla üç tane atanması kısıtı

$$1 \leq \text{count}(X_{ij}, k) \leq 3 \quad i = 1, \dots, 5 \quad k = 1, 2, 3 \quad \forall j$$

3.Kısıt: Ustabaşlarının her vardiyada en az iki, en fazla beş tane atanması kısıtı

$$2 \leq \text{count}(X_{ij}, k) \leq 5 \quad i = 6, \dots, 14 \quad k = 1, 2, 3 \quad \forall j$$

4.Kısıt: Ustaların her vardiyada en az iki tane atanması kısıtı

$$\text{count}(X_{ij}, k) \geq 2 \quad i = 15, \dots, 22 \quad k = 1, 2, 3 \quad \forall j$$

5.Kısıt: Usta yardımcılarının her vardiyada en az bir tane atanması kısıtı

$$\text{count}(X_{ij}, k) \geq 1 \quad i = 23, \dots, N \quad k = 1, 2, 3 \quad \forall j$$

6.Kısıt: Herhangi bir gün gece vardiyasında çalışan bir personelin ertesi gün sabah ve akşam vardiyalarında çalışmaması kısıtı

Kısıtın yazımında $(X_{ij} = m)$ gibi yazılan ifade KP'de kullanılan özel bir tanımlamadır. Bu şekilde parantez içinde yazılan ifadelerde eğer (X_{ij}) karar değişkeni m değerini almış ise $(X_{ij} = m)$ ifadesi 1 değerini döndürmekte, karar değişkeni m 'den farklı bir değer almış ise 0 değerini döndürmektedir.

$$(X_{ij} = 3) + (X_{i(j+1)} = 1) + (X_{i(j+1)} = 2) \leq 1 \quad j = 1, \dots, 30 \quad \forall i$$

7.Kısıt: Herhangi bir gün akşam vardiyasında çalışan bir personel ertesi gün sabah vardiyasında çalışmaması kısıtı

$$(X_{ij} = 2) + (X_{i(j+1)} = 1) \leq 1 \quad j = 1, \dots, 30 \quad \forall i$$

8.Kısıt: Herhangi bir personelin altı günden fazla art arda çalışmaması kısıtı

$$(X_{ij} = 4) + (X_{i(j+1)} = 4) + (X_{i(j+2)} = 4) + (X_{i(j+3)} = 4) + (X_{i(j+4)} = 4) + (X_{i(j+5)} = 4) \geq 1 \quad j = 1, \dots, 25, \quad \forall i$$

9.Kısıt: Karar değişkenininin 1-4 arasında tamsayılı değer alması kısıtı (X_{ij} 'nin k 'ya eşit olması)

$X_{ij} \in [1,4]$ ve tamsayı

Amaç fonksiyonu

Çalışmanın amaç fonksiyonu, personellerin atandıkları vardiyalarda toplam gün sayılarının hedeflerden pozitif ve negatif sapmalarının minimizasyonunu içermektedir.

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^{28} \sum_{k=1}^4 (d_{ik}^+ + d_{ik}^-)$$

Modelin çözümü "Intel (R) Core (TM) i5-3210 M CPU@2.50 GH" işlemciye, 8 GB belleğe ve Windows 10 işletim sistemine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. Oluşturulan HP modeli ILOG CPLEX Studio IDE 12.6.2.0 paket programında modellenmiş ve CPLEX çözücüsü ile çözülmüştür

Çözüm sonucunda elde edilen veriler ile vardiya çizelgesi oluşturulmuştur. Oluşturulan vardiya çizelgesi Şekil 2'de verilmiştir. Çizelgede çalışanların günlük çalışacakları vardiyalar ile izinli günleri görülebilmektedir.

Personel/ Gün	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
1	i	G	G	i	A	G	i	G	i	S	G	i	S	S	G	i	S	A	A	i	S	S	i	S	i	A	G	i	A	A	A		
2	S	i	i	S	S	S	G	i	A	G	i	G	G	i	A	i	A	G	i	S	A	i	S	S	G	i	A	A	A	i	G		
3	S	G	G	i	A	G	i	i	S	G	i	A	i	S	A	G	i	S	G	i	A	A	G	i	S	A	A	i	i	S	S		
4	A	i	S	A	i	S	A	A	i	S	A	G	i	G	i	S	A	G	i	i	S	G	i	S	G	i	S	G	i	A	G		
5	S	A	A	A	G	G	i	A	G	i	S	A	i	S	S	i	S	G	i	S	i	S	G	i	A	i	A	i	G	i	G		
6	G	i	S	i	S	A	G	i	A	G	i	G	i	S	S	S	A	i	i	G	i	A	A	A	i	S	A	G	G	i	S		
7	i	S	S	i	S	S	G	i	i	A	G	i	A	i	A	A	G	G	i	S	S	i	G	i	S	G	i	A	A	A	A	G	
8	S	i	G	i	A	A	A	G	i	S	i	S	G	i	S	A	i	S	S	A	i	S	S	G	G	i	A	A	A	A	G	i	
9	A	G	i	S	i	i	S	A	A	A	A	A	i	G	i	A	G	i	S	S	A	G	G	i	G	G	i	S	i	i	S	S	
10	S	S	G	G	G	i	A	i	S	i	A	A	i	G	i	i	i	A	G	G	G	i	S	i	A	A	i	S	S	S	A		
11	G	G	i	A	i	S	i	S	S	i	S	S	S	A	G	i	S	i	A	i	A	A	G	i	A	A	G	i	G	i	G		
12	i	A	A	G	i	G	i	G	G	G	i	A	A	G	i	A	A	i	S	i	A	i	S	S	S	i	S	S	S	S	G	i	
13	i	A	A	A	G	G	i	S	i	S	G	G	i	S	S	G	i	S	A	A	i	G	i	S	i	S	i	G	i	A	A		
14	A	i	i	S	A	i	S	A	G	i	S	i	S	A	i	S	G	G	G	i	S	S	A	A	i	G	G	i	A	i	G		
15	A	i	S	A	i	A	G	G	i	G	i	G	i	S	A	A	i	S	S	G	i	S	A	G	i	S	i	S	A	i	G		
16	S	A	G	G	G	i	A	A	A	A	A	i	S	G	i	A	i	G	i	S	i	S	i	S	A	i	S	A	i	S	G	i	A
17	S	i	S	G	i	A	A	G	i	A	G	i	S	i	i	G	i	S	A	A	G	i	S	A	i	S	i	S	A	G	G		
18	S	A	A	A	i	S	A	i	S	A	A	G	G	i	i	S	G	i	S	i	S	i	S	G	G	i	i	A	G	i	G		
19	G	i	S	S	A	A	i	S	A	i	S	A	G	i	G	i	G	i	G	G	i	S	A	i	S	A	A	i	G	i	S		
20	S	G	G	G	i	i	S	i	S	S	S	A	A	i	S	A	i	A	A	A	A	i	G	G	i	i	A	i	G	i	S	G	
21	S	S	i	i	S	A	A	G	G	G	i	S	G	i	S	S	A	A	i	A	i	G	i	A	i	G	G	i	S	i	A		
22	S	i	S	G	i	G	i	S	G	i	S	G	i	A	i	S	S	A	G	i	A	A	A	G	i	S	i	A	i	A	G		
23	G	i	A	i	S	A	A	A	A	A	G	G	i	i	S	S	S	i	A	A	G	i	G	G	i	S	S	G	i	i	S		
24	S	S	i	A	G	i	G	i	G	G	G	i	S	i	S	A	i	A	G	i	i	S	A	A	G	i	S	S	A	i	A		
25	A	A	G	i	i	S	S	S	S	i	S	A	A	G	i	G	i	G	G	G	i	A	i	S	i	G	i	A	i	S	A		
26	S	i	S	G	i	G	i	A	A	A	G	i	i	S	A	A	G	i	S	G	i	S	G	G	i	A	A	i	S	i	S		
27	S	i	i	S	A	G	i	G	i	S	i	S	S	A	A	A	i	S	S	A	G	i	i	A	i	G	i	G	G	G	G		
28	A	G	i	i	S	G	i	S	A	A	A	i	G	i	G	i	S	G	i	S	i	S	i	S	A	A	G	i	A	G	G		

Şekil 2. Vardiya çizelgesi

Figure 2. Shift schedule

Şekil 2'deki vardiya çizelgesinde "S" sabah vardiyasını, "A" akşam vardiyasını, "G" gece vardiyasını ve "i" izin günlerini göstermektedir. Personellerin vardiya dağılımları her gün hangi personelin hangi vardiyada bulunduğunu gösteren Şekil 2'den anlaşılabilir. Örneğin, 1 numaralı

personel ayın ilk gününde izinli iken 2 numaralı personel sabah vardiyasında çalışacaktır. Vardiya amiri (1,2,...,5), ustabaşı (6,7,...,14.), usta (15,16,...,22) ve usta yardımcısı (23,24,...,28) için vardiyalarda ihtiyaç duyulan personel sayısı sağlanmıştır. Bu sayede adaletli bir atama yapılırken işletme tarafından istenilen kısıtlar da yerine getirilmiştir. Bu çizelgenin amacı istenilen kısıtlar altında vardiya dağılımının en adaletli biçimde sağlanmasıdır. Bu sebeple Çizelge 1 oluşturularak çalışanların vardiya sayıları ve tatil günleri incelenmiştir. Çizelge 1’de bir personelin ay boyunca bulunduğu vardiyalar ve tatilleri verilmiştir.

Çizelge 1. Günlük vardiya ve izin sayıları

Table 1. Daily shifts and allowances

Vardiya	Sabah	Akşam	Gece	İzin	Vardiya	Sabah	Akşam	Gece	İzin
Personel					Personel				
1	7	7	7	10	15	7	7	7	10
2	7	7	7	10	16	7	7	7	10
3	7	7	7	10	17	7	7	7	10
4	7	7	7	10	18	7	7	7	10
5	7	7	7	10	19	7	7	7	10
6	7	7	7	10	20	7	7	7	10
7	7	7	7	10	21	7	7	7	10
8	7	7	7	10	22	7	7	7	10
9	7	7	7	10	23	7	7	7	10
10	7	7	7	10	24	7	7	7	10
11	7	7	7	10	25	7	7	7	10
12	7	7	7	10	26	7	7	7	10
13	7	7	7	10	27	7	7	7	10
14	7	7	7	10	28	7	7	7	10

Çizelge 1 incelendiğinde tüm personellerin vardiyalara ve tatil günlerine eşit atandığı görülmektedir. Hedef kısıtında vardiya sayılarının 8’e eşit olması istenmiştir. Elde edilen sonuçlar dikkate alındığında personellerin sabah, akşam ve gece vardiyalarına 7, izinli olma durumuna ise 10 kez atandığı görülmektedir. Vardiya hedeflerinden negatif sapma olduğu anlaşılmaktadır. Vardiya hedeflerinden olan negatif sapma değeri ise 1’dir. Aynı zamanda tatil hedefinden de pozitif sapmalar olduğu söylenebilmektedir. Bu pozitif sapma değeri ise 2’dir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda yeni ve adaletli, işin yeterli personel tarafından zamanında yerine getirildiği bir çizelge elde edilmiştir.

Bu çalışmada modelin etkinliğini göstermek için farklı senaryolar oluşturularak problem yeniden çözülmüştür. Oluşturulan senaryolarda personel sayısının artırılması durumu dikkate alınmıştır. Problem 36, 44 ve 52 personel olması durumları dikkate alınarak yeniden çözülmüştür. Çözüm süreleri ve sapma değişkenlerinin kıyaslanması için Çizelge 2 oluşturulmuştur.

Çizelge 2. Senaryolar ile elde edilen sonuçların kıyaslanması
Table 2. Comparison of the results obtained with scenarios

Personel Sayıları	d_{ort}^+	d_{ort}^-	Çözüm Süresi (s)
28	2	1	31,37
36	2	1	36,22
44	2	1	109,07
52	2	1	538,57

Çizelge 2'deki sonuçlar kıyaslandığında personel sayısı arttıkça çözüm süresinin uzadığı görülebilmektedir. Çözüm süresinin artmasına karşın sapma değişkenlerinin ortalama değeri personel sayısına göre değişiklik göstermemiştir. Personel sayısının artırılması problem boyutunu büyütmüş ve çözümünün zorlaşmasına sebep olmuştur. Başka bir ifade ile personel sayıları arttıkça çözüm süresinin artması beklenen bir durumdur. Bunun yanı sıra problem boyutunun büyümesine ve modelin çözümünün zorlaşmasına rağmen sapma değişkenlerinde bir değişiklik olmaması modelin etkinliğini kanıtlamaktadır. Model farklı sayıda personel grupları için kullanıldığında çözüm süresi uzasa dahi tutarlı sonuçları verebilmektedir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kesintisiz bir enerji ihtiyacının olduğu günümüz dünyasında bu ihtiyacı karşılayabilmek için enerji santralleri duraksamadan çalışmaktadır. Kullanıcıya ihtiyaç duyduğu enerjinin sağlanması hem bir hizmet faaliyeti hem de bir üretim faaliyeti olarak nitelendirilebilir. İhtiyaç duyulan enerjinin karşılanamaması durumunda hem kullanıcı hem de enerji santrali büyük maddi kayıplara uğrayacaktır. Enerjinin kullanıcıya istenilen zamanda herhangi bir kesintiye uğramadan ulaşmasını sağlamak enerji santrallerinde çalışan personellerin görevidir. Bu sebeple enerji santrallerinde vardiyaya dayalı bir çalışma sistemi bulunmaktadır. Personellerin sürekli çalışması gereken sistemin içerisinde bulunması ve sistemle birlikte sürekli çalışır durumda olması ancak vardiyalı bir çalışma planı sayesinde mümkün olabilir. Bu çalışmada bir hidroelektrik santralde çalışan personellerin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemin çözümü için öncelikle KP ile model oluşturulmuştur. KP-HP entegrasyonu ile oluşturulan model ILOG CPLEX optimizasyon programına yazılmış ve çözülmüştür. Vardiyanın adaletli dağıtılması ve ihtiyaç duyulan personel sayısının karşılanması temel alınan model ile optimal sonuçlar elde edilmiştir. Çözüm sonucunda elde edilen veriler ile yeni bir vardiya çizelgesi oluşturulmuş ve daha önce bir yöntemle bağlı olmaksızın oluşturulan çizelge yerine bu çizelge önerilmiştir.

Literatürde oldukça büyük bir yer edinmiş çizelgeleme problemlerinin bir alt türü olan vardiya çizelgeleme hakkında da pek çok çalışma bulunmaktadır. Birbirinden farklı sektörlerde vardiyalı çalışan tüm personeller için çizelgeleme çalışması yapılabilmektedir. Yapılan çalışmalarda tam sayılı programlama ve HP yöntemleri ile genellikle güvenlik personelleri, hemşireler gibi personel gruplarının çizelgelenmesi görülmektedir. Bu çalışmada ise, literatürde incelenen çalışmalardan farklı olarak üzerinde çok çalışılmamış bir sektör olan enerji sektöründe çalışan personel grubu ele alınmıştır. Hidroelektrik santrallerde çalışan personeller için yapılan çizelgenin modelinin kurulmasında ise KP yönteminden yararlanılmıştır.

Bu çalışmada, literatürde üzerinde az çalışılmış bir alan olan enerji sektöründeki hidroelektrik santral personeli için bir vardiya çizelgeleme çalışması ele alınmıştır. Literatürde yer alan vardiya çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde, araştırmacıların tamsayı programlama yöntemini daha yaygın olarak kullandığına rastlanmıştır. Bir gerçek hayat problemini ele alan bu çalışmada ise, problemin

kapsadığı birden çok amaç yukarıda ifade edilen avantajlardan dolayı KP-HP entegrasyonu ile ele alınmış ve literatüre yeni bir model önerilmiştir. HP'nin birden fazla amacı sağlayan yapısı ile KP'nin çözüm algoritmasının bir arada kullanıldığı model çalışmanın literatüre kattığı metodolojik yenilik olarak kabul edilebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, enerji sektöründe çalışan personellerin çizelgenmesi için literatürde yaygın kullanılan matematiksel modelleme yöntemlerinden HP ve tamsayı programlama kullanılabilir. Ayrıca, hem bu çalışma kapsamında önerilen modelde kullanılan yöntem kombinasyonu hem de HP ve tamsayı programlama yöntemleri hidroelektrik santraller dışındaki enerji santrallerinde çalışan personellerin çizelgenmesi için kullanılabilir. Personel sayısı, vardiya sayısı ve çizelgeme periyodu gibi parametreler değiştirilerek problem yeniden çözümü de yapılması muhtemel çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında önerilen modelde dikkate alınmamış olan özel personel istekleri, cinsiyet ve tecrübe kısıtları ilerleyen çalışmalara eklenilebilir. Son olarak, bu çalışma kapsamında önerilen model, benzer çalışma koşullarına sahip farklı sektörlerdeki personel gruplarının çizelgenmesi için geliştirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alağaç H. M., Pınarbaşı M., Yüzükırmızı M., Toklu B., Karma modeli tip-2 montaj hattı dengeleme problemi için bir kısıt programlama modeli, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(4), 340-348, 2016.
- Alağaç H. M., Yüzükırmızı M., Türker A. K., Stokastik Montaj Hatlarının Kısıt Programlama Ve Kapalı Kuyruk Ağları İle Dengelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28(2), 231-240, 2013.
- Alağaç H.M., Karma Modeli Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Kısıt Programlama Modeli Ve Arama Stratejileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
- Arslan E., Kısıt programlama ile çizelgeme problemlerinin çözülmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010.
- Apt K., Principles Of Constraint Programming, Cambridge university press, Birleşik Krallık, 2003.
- Aykin T., Optimal shift scheduling with multiple break Windows, Management Science, 42(4), 591-602 1996.
- Bedir N., Vardiya çizelgeme probleminin kombine AHS-PROMETHEE ve hedef programlama yöntemleri ile çözümü: Bir hidroelektrik santral örneği, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 2017.
- Bard J.F., Binici C., De Silva A.H., Staff scheduling at the United States Postal Service, Computers and Operations Research, 30, 745-771, 2003.
- Bedir N., Eren T., Dizdar E.N., Ergonomik Personel Çizelgeme ve Perakende Sektöründe Bir Uygulama, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5 (3), 657-674, 2017.
- Charnes A., Cooper W.W., Ferguson R., Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming, Management Science, 1, 138-151, 1955.
- Charnes A., Cooper W.W., Management Models and Industrial Applications of Linear Programming, Wiley, New York, 1961.
- Ciritcioğlu C., Akgün S., Varlı E., Eren T., Kırıkkale Üniversitesi güvenlik görevlileri için vardiya çizelgeme problemine bir çözüm önerisi, Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi, 9 (2), 1-23, 2017.
- Demirel B., Yelek A., Alağaç H. M., Eren T., ANKARAY Güvenlik Personelinin Vardiya Çizelgeme Probleminin Hedef Programlama Yöntemi ile Çözümü, Demiryolu Mühendisliği Dergisi, 8, 1-17, 2018.
- De Silva A., Combining constraint programming and linear programming on an example of bus driver scheduling, Annals of Operations Research, 108(1-4), 277-291, 2001.
- Eitzen G., Panton D., Mills G., Multi-Skilled Workforce Optimization, Annals of Operations Research, 127, 359-372, 2004.

- Eren T., Özder E., Varlı E., Hedef Programlama Yaklaşımı İle Temizlik Personeli Çizelgeleme Problemi İçin Bir Model Önerisi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 114-127, 2017.
- Fırat M., Hurkens C. A. J., An improved MIP-based approach for a multi-skill workforce scheduling problem, *Journal of Scheduling*, 15(3), 363-380, 2012.
- Goel V., Slusky M., Hoeve W.-J., Furman, K. C., Shao, Y., Constraint programming for LNG ship scheduling and inventory management, *European Journal of Operational Research*, 241(3), 662-673, 2015.
- Günther M., Nissen V. Sub-daily staff scheduling for a logistics service provider., *KI-Künstliche Intelligenz*, 24(2), 105-113, 2010.
- Gür Ş., Eren T., Alakaş H.M., Surgical Operation Scheduling with Goal Programming and Constraint Programming: A Case Stud, *Mathematics*, 7, 251, 2019.
- Gür Ş., Eren T., Scheduling and Planning in Service Systems with Goal Programming: Literature Review, *Mathematics*, 6(11), 265, 2018.
- Ignizio J. P., *Goal Programming and Extensions*, Lexington Mass: Heath, Lexington Books, Lexington, MA, 1976.
- Ignizio J.P., *Introduction to goal programming*, Sage Publications Inc., Beverley Hills, California, 1985.
- Kanet J. C., Ahire S. L., Gorman M. F., Constraint programming for scheduling. In J. Y. T. Leung (Ed.), *Handbook of Scheduling*, Boston: CRC Press, 47, 1-21, 2004.
- Laporte G., Pesant G. A., General multi-shift scheduling system, *Journal of the Operational Research Society*, 55 (11), 1208-1217, 2004.
- Lee S. M., *Goal Programming for Decision Analysis*, Auerbach, Philadelphia, 1972.
- Lezaun M., Perez G., De La Maza E.S., Crew rostering problem in a public transport company *Journal of the Operational Research Society*, 57(10), 1173-1179 2006.
- Louly M.A., A goal programming model for staff scheduling at a telecommunications center, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 12, 167-178, 2013.
- Özcan E.C., Varlı E., Eren T., Hedef programlama yaklaşımı ile hidroelektrik santrallerde vardiya personeli çizelgeleme, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10 (4), 363-370, 2017.
- Özder E. H., Özcan E., Eren T., Staff Task-Based Shift Scheduling Solution with an ANP and Goal Programming Method in a Natural Gas Combined Cycle Power Plant, *Mathematics*, 7(2), 192, 2019.
- Öztürkoğlu Y., Çalışkan F., Hemşire Çizelgelemede Esnek Vardiya Planlaması ve Hastane Uygulaması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 16(1), 115-133, 2014.
- Pamir N., Enerji Politikalar ve Küresel Gelişmeler, *Stratejik Analiz*, 6(68), 57-73, 2005.
- Pınarbaşı M., Montaj hatlarının dengelenmesinde kısıt programlama ve kuyruk ağları yaklaşımları, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- Pour S. M., Drake J. H., Ejlertsen L. S., Rasmussen K. M., Burke E., Constraint Programming/Mixed Integer Programming framework for the preventive signaling maintenance crew scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 269 (1), 341-352, 2018.
- Rodriguez J., A Constraint programming model for real-time train scheduling at junctions, *Transportation Research Part B: Methodological*, 41 (2), 231-245, 2007.
- Shuib A., Kamarudin F. I., Solving shift scheduling problem with days-off preference for power station workers using binary integer goal programming model, *Annals of Operations Research*, 272(1-2), 355-372, 2019.
- Sungur, B., Bulanık vardiya çizelgeleme problemleri için tamsayı programlama modeli, *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 30, 211-227, 2008.
- Tc Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Hidrolik, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrolik>, Erişim tarihi 5 Mayıs, 2019.
- Topaloglu S., A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents. *Computers & Industrial Engineering*, 51(3), 375-388, 2006.

- Trilling L., Guinet A., Le Magny D., Nurse scheduling using integer linear programming and constraint programming, *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3), 671-676, 2006.
- Ünsal, Ö., *Constraint Programming Approach to Quay Crane Scheduling Problem*, Yüksek Lisans Tezi, Koç Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- Ürker O., Çobanoğlu N., Türkiye’de hidroelektrik santraller’in durumu (HES’ler) ve çevre politikaları bağlamında değerlendirilmesi, *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(2), 65-88, 2017.
- Varlı E., Eren T., Genç M. A., Çetin S., “Ankara Metrosu M1 Hattındaki Vatmanların Vardiya Saatlerinin Çizelgenmesi”, 3. Uluslararası Raylı Sistemler Mühendisliği Sempozyumu, Karabük, 279-285, 2016.
- Varlı, E., Eren T., Vardiya çizelgeleme problemi ve bir örnek uygulama. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(2), 185-197, 2016.
- Varlı E., Eren T., Vardiya çizelgeleme problemi ve bir örnek uygulama, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10 (2), 185-197, 2016.
- Yağcıoğlu Ş., Çetin H., Güngör İ., Kredi ve Yurtlar Kurumu Yöneticileri İçin Vardiya Planlamasında Bir Model Önerisi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 14 (2), 283-305, 2016.
- Yelek A., Demirel B., Alağaç H. M., Eren T., Kısmi Zamanlı Çalışan Personellerin Çizelgenmesi: Kırıkkale Üniversitesi Merkez Kütüphanesi Örneği, *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 8 (2), 313-330, 2018.
- Yılmaz M., Türkiye’nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi, *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54, 2012.
- Yunes T.H., Moura A.V., De Souza C.C., Hybrid column generation approaches for urban transit crew management problems, *Transportation Science*, 39(2), 273-288, 2005.
- Yüksel İ., Çalışma Yaşamı Kalitesinin Tipik ve A tipik İstihdam Açısından İncelenmesi, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 5 (1), 47- 58, 2004.



TDY 2007 VE TBDY 2018 YÖNETMELİKLERİNE GÖRE YAPI YÜKSEKLİĞİNİN TABAN KESME KUVVETİ VE TEPE DEPLASMANI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

¹İsmail ÜNSAL , ²Fatih Ali ÖNCEL , ³Mehmet Fatih ŞAHAN 

^{1,3}Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman, TÜRKİYE

² Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adıyaman, TÜRKİYE

¹iunsal@adiyaman.edu.tr, ²oncel02ali@gmail.com, ³mfs@adiyaman.edu.tr

(Geliş/Received: 12.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.08.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018) ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) kapsamında bina yüksekliğinin, toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) ve maksimum tepe deplasmanı üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla ele alınan yapı örneği, ETABS bilgisayar programında, başta 30 kat olarak modellenmiş ve yapılan her analiz sonrası 1 adet ara kat eksiltilecek şekilde 5 ile 30 katlar arasındaki 26 adet model için analizler tekrarlanmıştır. Yapının 15 metre ile 91 metre arasında değişen yüksekliklere sahip modelleri için Mod birleştirme yöntemine göre hesaplanmış olan taban kesme kuvveti ve maksimum tepe deplasmanı gibi büyüklükler kaydedilmiştir. TBDY 2018 esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin TDY 2007 esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinden çok daha düşük değerler aldığı gözlenmiştir. TBDY 2018 esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin ise yapı yüksekliği arttıkça doğrusala yakın bir ilişki ile azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca taban kesme kuvveti değerlerinin yakın olması halinde, TBDY 2018 esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinin TDY 2007 esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tepe deplasmanları, periyot, taban kesme kuvveti, deprem, TBDY 2018

Investigation on The Effect of Building Height on Base Shear Force and Top Displacement According to Turkish Earthquake Code 2007 and 2018

ABSTRACT: In this study, the effect of the building height on the total equivalent seismic load (base shear) and the maximum top displacement was examined comparatively, within the scope of the Turkish Earthquake Code 2007 and 2018. The structure sample handled for this purpose was modeled as 30 storey at first in the ETABS computer program and after each analysis, 1 intermediate floor was decreased and analyzes were repeated for 26 models between 5 and 30 floors. For models of the building with heights ranging from 15 meters to 91 meters, values such as the base shear force and maximum top displacement obtained according to the response spectrum analysis were recorded. It was observed that the base shear force values obtained based on the 2018 earthquake regulation are much lower than the values obtained based on the 2007 earthquake regulation. It was observed that the base shear force values obtained based on the 2018 earthquake regulation decreased in linear relation with the increase in the height of the building. In addition, in case of equivalent values for base shear forces, it was observed that the maximum top displacement values obtained based on the 2018 earthquake regulation are much larger than the values obtained based on the 2007 earthquake regulation.

Key Words: Top displacements, period, base shear forces, earthquake, TBDY 2018

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Depremler tüm dünyada sürekli biçimde büyük can ve mal kayıplarına yol açan doğal afetler olarak gündemden düşmemektedir. Bu bağlamda dünyada ve Türkiye’de hemen her yıl orta veya ağır hasar oluşturan çok sayıda deprem yaşanmaya devam etmektedir. Türkiye Cumhuriyeti’nin kuruluşundan sonra yaşadığı ilk büyük doğal afet 1939 Erzincan depremidir. Bu büyük deprem, ülkede depreme dayanıklı yapı kavramının ortaya çıkması ile başlayan ve bugüne kadar gelen sürecin çıkış noktasıdır. Ülkenin ilk deprem yönetmelikleri bu dönemde yürürlüğe konulmuştur. Formel anlamda ilk yönetmelik Bayındırlık Bakanlığı’nca 1947’de yürürlüğe konulan ‘Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği’dir. Bu yönetmeliği 1953, 1961, 1968, 1975, 1997 (1998) ve 2006 (2007) yönetmelikleri izlemiştir. Bu yönetmeliklerin tamamı, yürürlükte oldukları dönemde meydana gelen depremlerden elde edilen deneyimler ile bilimsel ve teknolojik gelişmeler ışığı altında ele alınmış ve değiştirilmişlerdir. Günümüzde inşaat mühendisliğinin en önemli konularından biri olan “Yapıların Deprem Analizi” ile ilgili hesaplar çok basitte olsa ilk kez 1949 Deprem Yönetmeliğinde yer almış olup daha sonraki yönetmeliklerde deprem hesapları gittikçe ayrıntı kazanmıştır.

Günümüzde inşaat mühendisliğinin en önemli konularından biri olan “Yapıların Deprem Analizi” ile ilgili hesaplar çok basitte olsa ilk kez 1949 Deprem Yönetmeliğinde yer almış olup daha sonraki yönetmeliklerde deprem hesapları gittikçe ayrıntı kazanmıştır. 1968 Deprem Yönetmeliğinin daha öncekilerden en önemli farkı deprem hesabının daha ayrıntılı olarak ele alınmış olmasıdır. 1975 Deprem Yönetmeliğinde ise deprem kuvvetlerinin birçok parametreye göre çok daha detaylı bir şekilde hesaplandığı görülmektedir. 1998 ve 2007 yılı yönetmeliklerinde hesap yöntemlerinden bahsedilmiş ve bunlar; Eşdeğer Deprem Yüğü, Mod Birleştirme ve Zaman Tanım Alanında Hesap yöntemleri olmak üzere üç başlık altında toplanmış ve her bir hesap yönteminin uygulanabilme koşulları belirlenmiştir.

Son olarak Türkiye Bina Deprem yönetmeliği 2018 yılında güncellenerek resmî gazetede yayınlanmasıyla 2019 yılında yürürlüğe girmiştir. Ayrıca Türkiye Deprem Tehlike Haritası 2018 yılında Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından güncellenmiştir. Literatürde Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik- 2007 (TDY 2007) ile Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği- 2018 (TBDY 2018) yönetmeliğini kıyaslayan çeşitli çalışmalar mevcuttur.

Çetin ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada Türk Deprem Yönetmeliği-2007 ve Türk Bina Deprem Yönetmeliği-2018’e göre farklı yerel zemin sınıflarının yapılardaki burulma düzensizliğine etkisini araştırmışlardır. Yazarlar çalışmalarındaki modelleme ve deprem analizlerini SAP 2000 programında yapmış ve Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi ve Mod Birleştirme Yöntemi kullanarak 5 farklı yapı tipi için 270 adet yapının deprem analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

Öztürk (2018), 1996 tarihli deprem tehlike haritasında sırasıyla 1., 2., 3. ve 4. bölgede yer alan çeşitli illerimizi içeren bölgelerde tasarım depremi için 2 farklı zemin cinsi altında ve 2 farklı periyot değeri için eski ve yeni yönetmeliklerin karşılaştırması yapılmıştır.

Nemutlu ve ark. (2018), taşıyıcı sistemi betonarme çerçevelerden oluşan 4 katlı bir bina ile betonarme çerçeve ve perdelerden oluşan 9 katlı bir binayı esas alarak, 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre yaptıkları analizlerde taban kesme kuvveti değerlerinin değişimlerini incelemişlerdir.

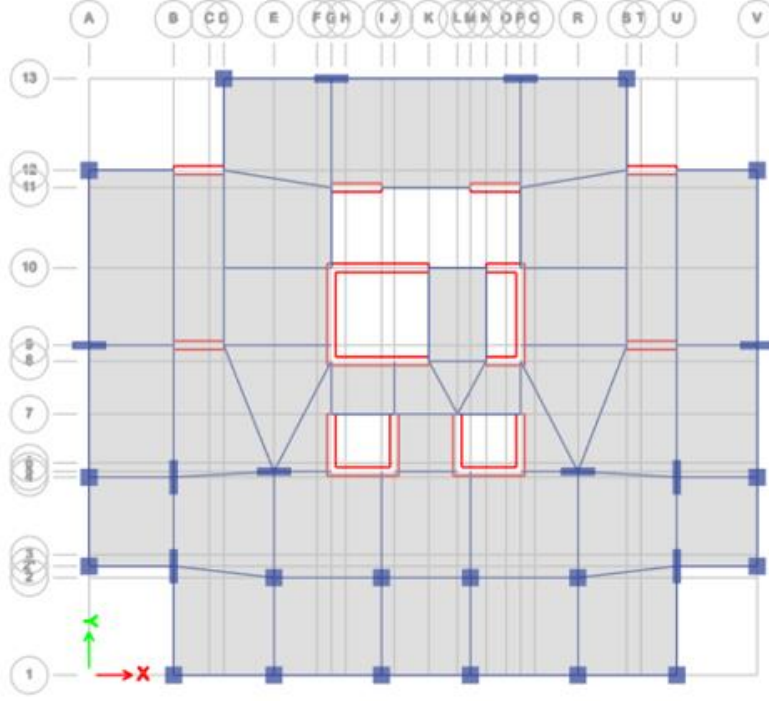
Öztürk ve ark. (2019), deprem ivmelerinin yüksek olduğu iki ilimizi ele alarak 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerini yapı periyodu, taban kesme kuvveti, görelî kat ötelemeleri ve ikinci mertebeye etkileri gibi parametreleri esas alarak karşılaştırmışlardır.

Koçer ve ark. (2018), ülkemizde farklı illeri esas alarak farklı zemin sınıfları için 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerinde yer alan tasarım spektrumlarından elde edilen spektral ivme değerleri arasında bir kıyaslama yaparak sonuçları yorumlamışlardır. Ele alınan bölgelerle sınırlı olmakla beraber genel olarak zayıf zemin grupları için TBDY 2018’in TDY 2007’ye göre daha güvenli tarafta kaldığını gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmada, TBDY 2018 ve TDY 2007 kapsamında bina yüksekliğinin, bina tabanında oluşacak toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

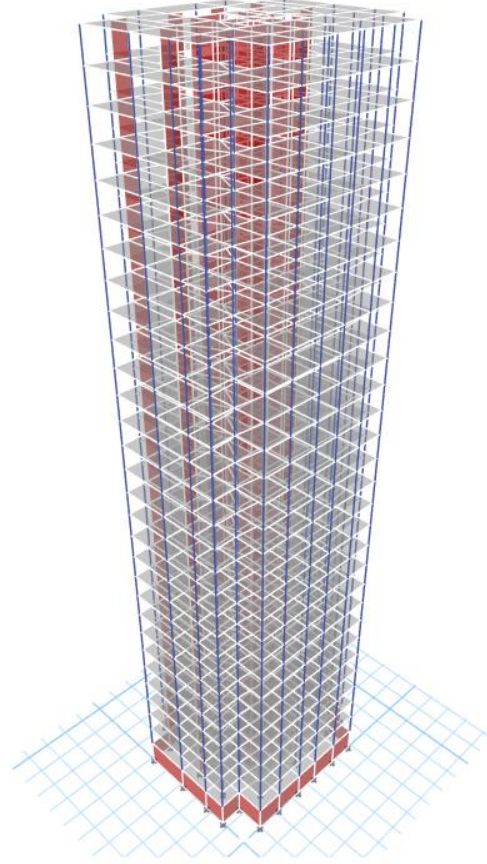
YÖNTEM (METHOD)

Bu çalışmada hali hazırda Adana ilimizde mevcut ve literatürde (Ünsal, 2013) irdelenmiş olan bir yapı ele alınmıştır. Yapı, mevcut haliyle 2007 Deprem Yönetmeliği esas alınıp 27 katlı olarak projelendirilmiş ve inşa edilmiştir. Yapının plan ve perspektif görünüşü sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2’de verilmiştir. Yapının bir normal katının alanı yaklaşık olarak 430 m² olup kat yükseklikleri ve kat ağırlıkları ile ilgili bilgiler Tablo 1’de verilmiştir. Mevcut yapı 2007 Deprem Yönetmeliğine göre 2. Derece deprem bölgesinde bulunmaktadır.



Şekil 1. Yapının planı

Figure 1. Plan of the building



Şekil 2. Yapının perspektif görünüşü
Figure 1. Perspective view of the building

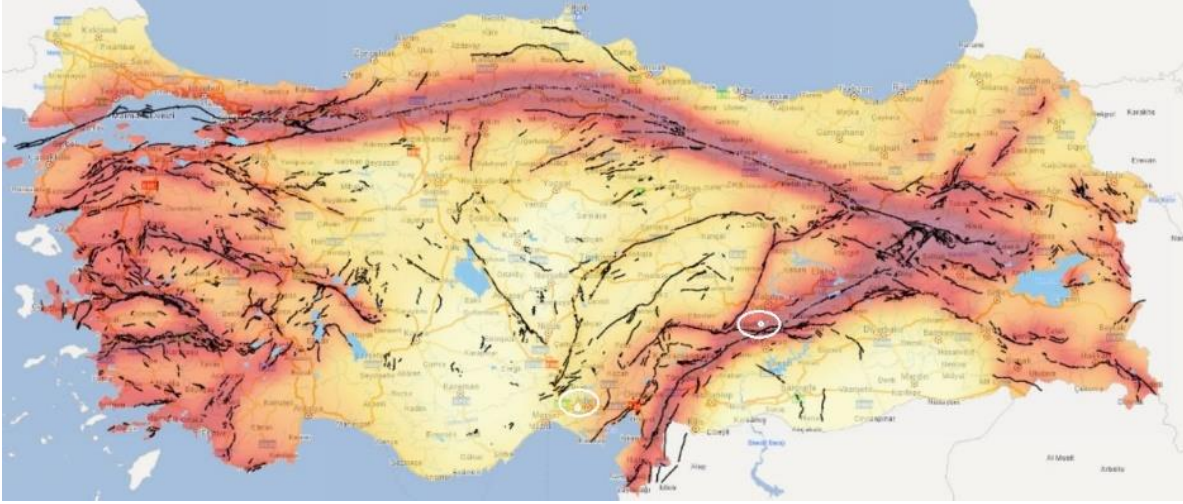
Çizelge 1. Yapıya ait kat yükseklikleri ve ağırlık bilgileri
Table 1. Storey heights and weight information of the building

KAT	YÜKSEKLİK (metre)	AĞIRLIK (ton)
1. kat	3,50	863,38
2.-29. katlar	3,00	774,033
30. kat	3,00	620,97
TOPLAM	90,50	23.157,28

Bu yapı örneği, uluslararası geçerliliğe sahip olan ETABS Bilgisayar Programı yardımı ile modellenmiştir. Yapı başta 30 kat olarak modellenmiş ve yapılan her analiz sonrası 1 adet ara kat eksiltilerek 5 ile 30 katlar arasındaki 26 adet model için analizler tekrarlanmıştır. Analizler, Adana ve Adıyaman illeri esas alınarak iki farklı deprem bölgesi için yapılmıştır. Böylece faya uzaklık ve spektral ivme değerleri gibi farklı depremsellik özellikler de dikkate alınmıştır. Adana ve Adıyaman illerinde esas alınan lokasyonların Fay haritası üzerindeki gösterimi Şekil 3’de verilmiştir. Yapının Adana ve Adıyaman lokasyonları için 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri esas alınarak elde edilen yatay elastik tasarım spektrum grafikleri Şekil 4’te verilmiştir.

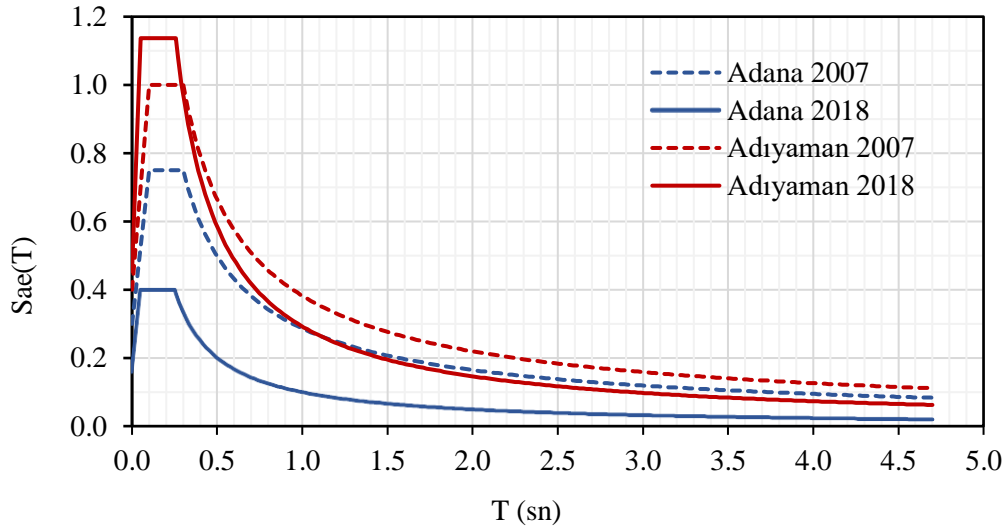
2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri esas alınarak yapılan analizlerde, yapının 15 metre ile 91 metre arasında değişen yüksekliklere sahip modelleri için elde edilen taban kesme kuvvetleri ve maksimum tepe deplasmanlarına ait veriler kaydedilmiştir. Her iki yönetmeliğe göre elde edilen veriler karşılaştırılarak yapı yüksekliğinin davranışa etkisi irdelenmiştir.

Modal analiz sonucu X ve Y yönleri için elde edilen birinci doğal titreşim periyotları Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 3. Ele alınan lokasyonların fay haritası üzerindeki gösterimi

Figure 3. Display of the locations considered on the fault map



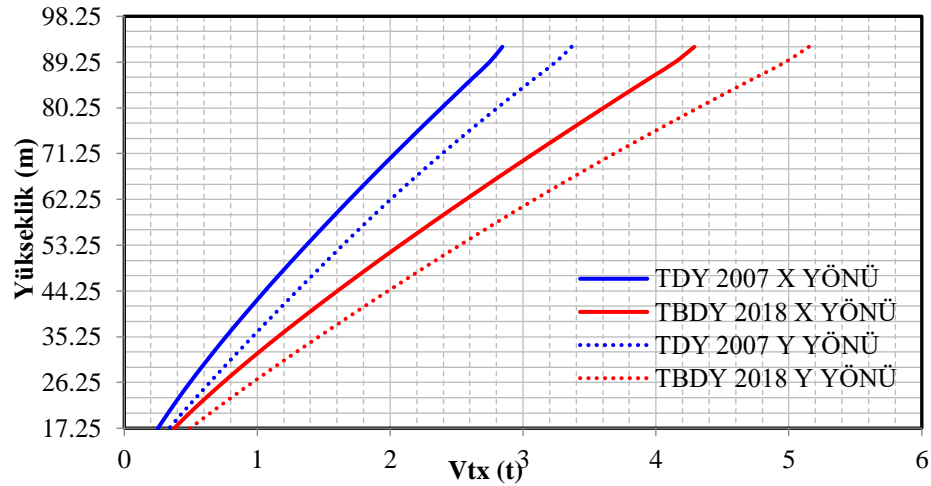
Şekil 4. Yatay elastik tasarım ivme spektrum grafikleri

Figure 4. Horizontal elastic design acceleration spectrum charts

Şekil 4.'te verilen tasarım ivme spektrum grafikleri 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri esas alınarak Adana ve Adıyaman lokasyonları için hazırlanmıştır. Yerel zemin sınıfı olarak ZA zemin grubu esas alınmıştır. Adana 2007 ve Adıyaman 2007 spektrumları için etkin yer ivmesi katsayısı (A_0) değeri sırasıyla 0,3 ve 0,4 olarak alınmıştır. Bina önem katsayısı $I = 1$ olarak alınmıştır. 2018 deprem yönetmeliğinde, yüksek yapıların II. Ve III. Aşama hesabında sönüm oranı için farklı değerler verilse de I. Aşama hesabın "Dayanım Göre Tasarım" (DGT) yaklaşımı ile ön tasarım olarak yapılması gerektiği belirtilmektedir. Buna istinaden sönüm oranları tüm spektrumlarında %5 olarak alınmıştır.

Şekil.4'teki spektrum grafiği incelendiğinde Adana ilinde ele alınan lokasyon için, 2018 deprem yönetmeliğine göre elde edilen elastik tasarım spektral ivme $S_{ae}(T)$ değerlerinin, grafiğin gerek pik kısmında gerekse kuyruk kısmında 2007 deprem yönetmeliği için elde edilen değerlere göre oldukça düşük seviyede kaldığı görülmektedir.

Adıyaman ilinde ele alınan lokasyon için ise, 2018 deprem yönetmeliğine göre elde edilen elastik tasarım spektral ivme $S_{ae}(T)$ değerleri, grafiğin pik kısmında 2007 deprem yönetmeliği için elde edilen değerlere göre daha yüksek seviyede kalırken grafiğin kuyruk kısmında 2007 deprem yönetmeliği için elde edilen değerlere göre daha düşük seviyede kalmaktadır (Şekil.4).



Şekil 5. X ve Y yönü yapı periyotları

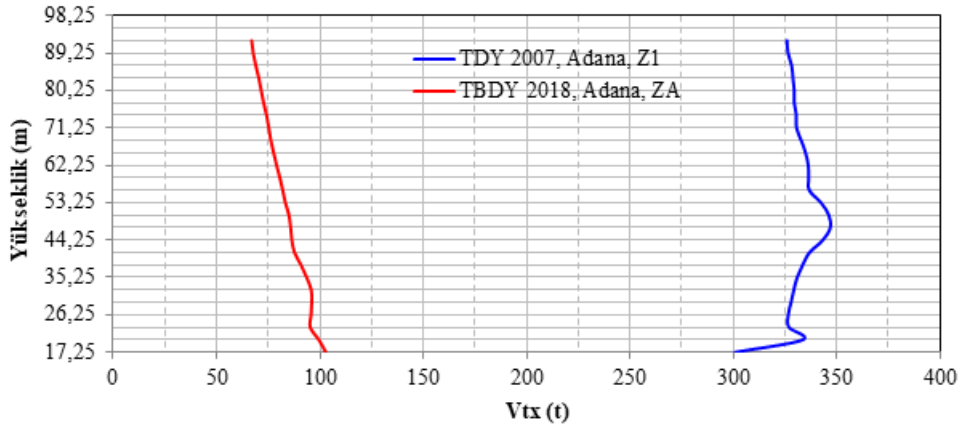
Figure 5. X and Y direction structure periods

ETABS bilgisayar programından her iki yönetmeliğe göre X ve Y yönleri için elde edilen yapı periyotlarına ait büyüklükler Şekil 5'deki grafikte karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 2018 deprem yönetmelikleri esas alınarak hesaplanan yapı periyotlarının, 2007 deprem yönetmelikleri esas alınarak hesaplanan yapı periyotlarından daha büyük daha büyük değerler aldığı görülmektedir (Şekil.5). Bu farkın oluşmasında 2018 deprem yönetmeliği ile birlikte gelen "Etkin Kesit Rijitliği Çarpanları" faktörünün etkisi büyüktür. Yönetmelik gereğince, dayanıma göre tasarım kapsamında betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kesit özellikleri modellenirken eleman rijitlikleri etkin kesit rijitliği çarpanları ile çarpılarak azaltılmaktadır. Eleman rijitliklerinin azaltılmasının bir sonucu olarak taşıyıcı sistemin periyodunun büyüdüğü görülmektedir (Şekil.5).

Mod Birleştirme Yöntemi ile her iki yönetmeliğe göre elde edilen taban kesme kuvvetine ait büyüklükler, Adana ilindeki lokasyon için Şekil 6'da ve Adıyaman ilindeki lokasyon için Şekil 7'deki grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

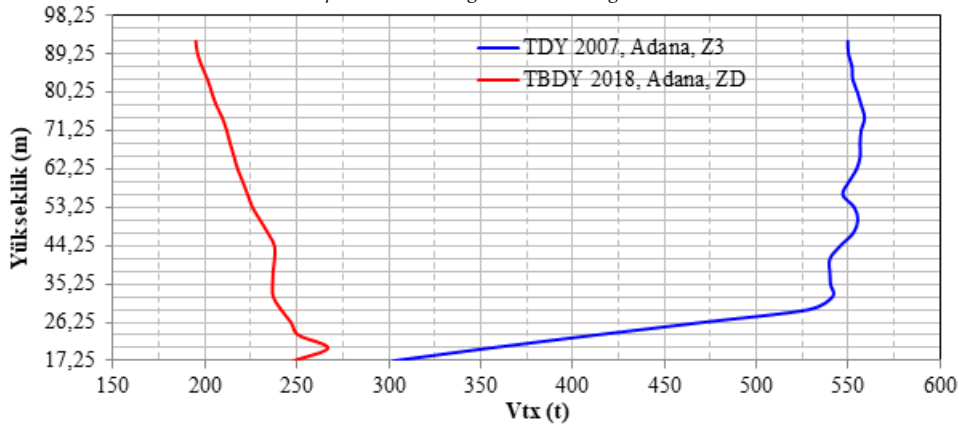
2018 deprem yönetmeliğinde yerel zemin sınıfları için yeni kriterler getirilmiş olup 2007 deprem yönetmeliğinde belirtilenden daha farklı bir sınıflandırma tablosu verilmektedir. Bu çalışmada, her iki yönetmeliğe göre yapılan analizlerin sonuçlarını sağlıklı olarak karşılaştırabilmek üzere yerel zemin parametrelerinin benzer seçilmesi amacıyla kayma dalgası hızı ve ortalama standart penetrasyon darbe sayısı gibi parametreler esas alınarak bir değerlendirme yapılmış olup 2007 yönetmeliğinde Z1, Z3 ve Z4 olarak verilen zeminlerin 2018 yönetmeliğinde sırasıyla ZA, ZD ve ZE olarak verilen zeminlere benzediği kabul edilmiştir.

Benzer şekilde her iki deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanlarına ait büyüklükler, Adana ilindeki lokasyon için Şekil 8'de ve Adıyaman ilindeki lokasyon için Şekil 9'daki grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



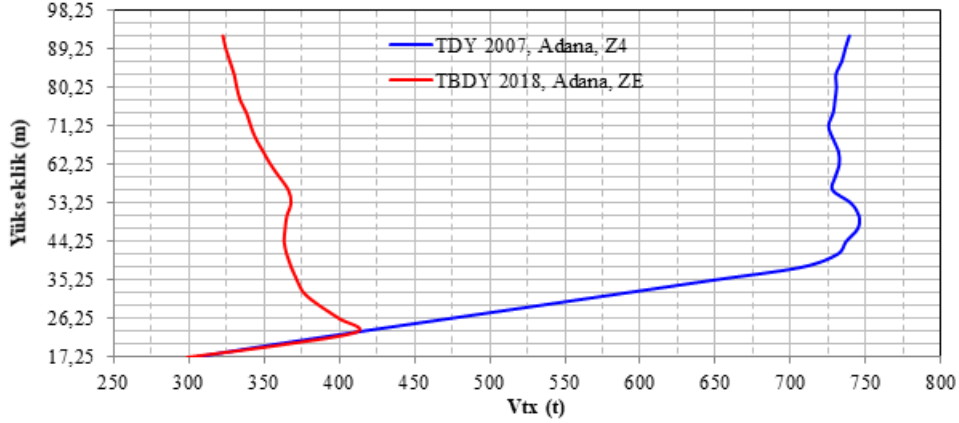
a) Z1 ve ZA zemin sınıflarına göre karşılaştırma

a) Comparison according to Z1 and ZA ground classes



b) Z3 ve ZD zemin sınıflarına göre karşılaştırma

b) Comparison according to Z3 and ZD ground classes

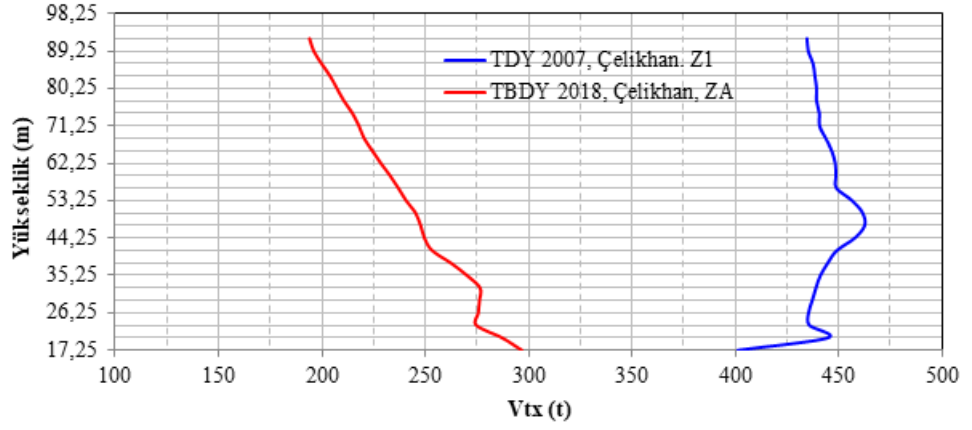


c) Z4 ve ZE zemin sınıflarına göre karşılaştırma

c) Comparison according to Z4 and ZE ground classes

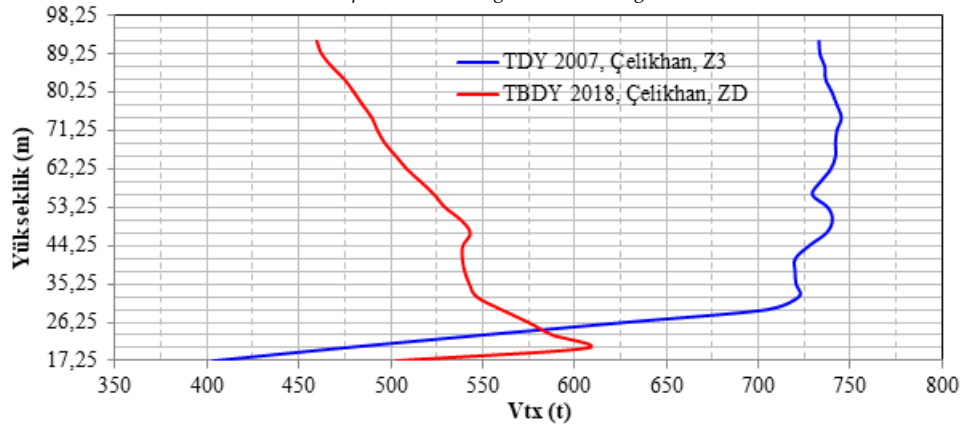
Şekil 6. Adana Lokasyonunda Yapının X ve Y yönleri için elde edilen taban kesme kuvvetleri

Figure 6. Base shear forces obtained for the X and Y directions of the Building in Adana Location



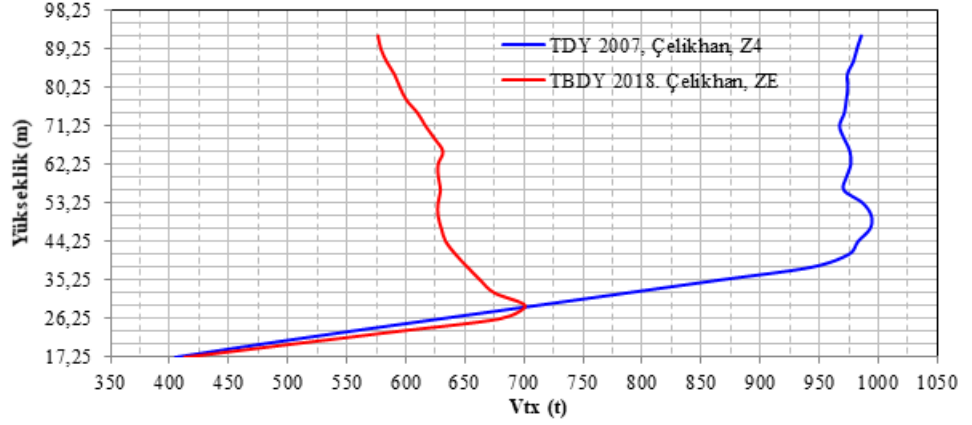
a) Z1 ve ZA zemin sınıflarına göre karşılaştırma

a) Comparison according to Z1 and ZA ground classes



b) Z3 ve ZD zemin sınıflarına göre karşılaştırma

b) Comparison according to Z3 and ZD ground classes

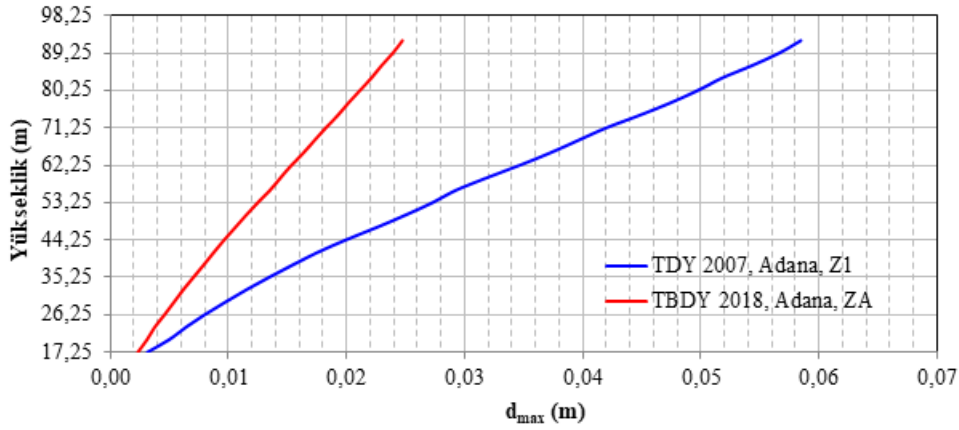


c) Z4 ve ZE zemin sınıflarına göre karşılaştırma

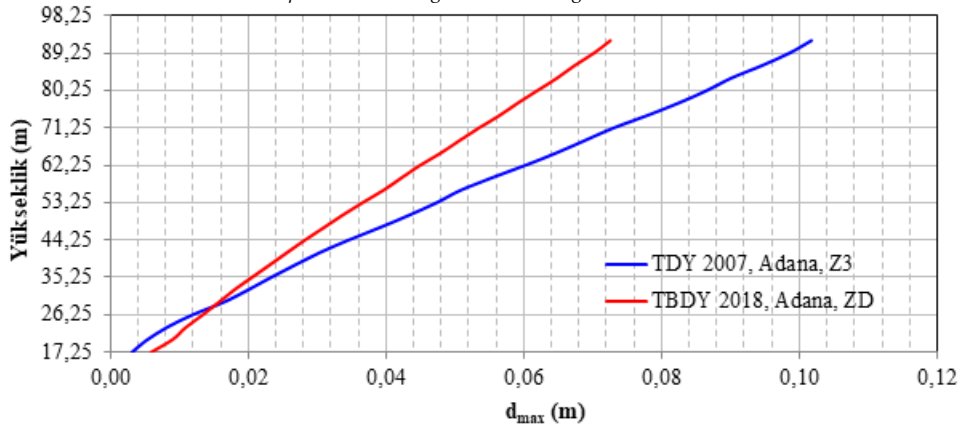
c) Comparison according to Z4 and ZE ground classes

Şekil 7. Adıyaman Lokasyonunda Yapının X ve Y yönleri için elde edilen taban kesme kuvvetleri

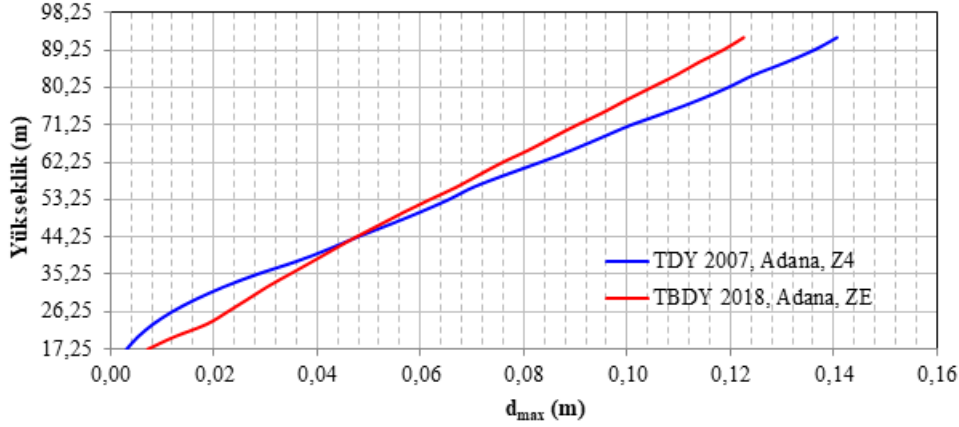
Figure 7. Base shear forces obtained for the X and Y directions of the Building in Adıyaman Location



a) Z1 ve ZA zemin sınıflarına göre karşılaştırma
a) Comparison according to Z1 and ZA ground classes



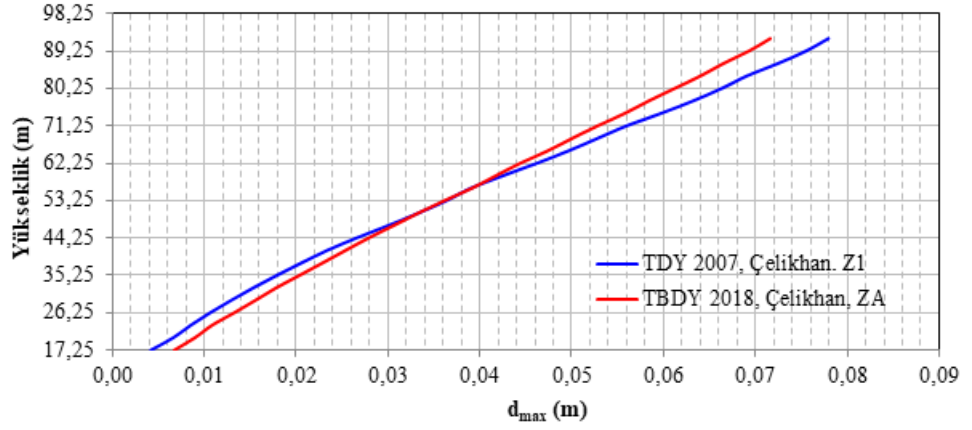
b) Z3 ve ZD zemin sınıflarına göre karşılaştırma
b) Comparison according to Z3 and ZD ground classes



c) Z4 ve ZE zemin sınıflarına göre karşılaştırma
c) Comparison according to Z4 and ZE ground classes

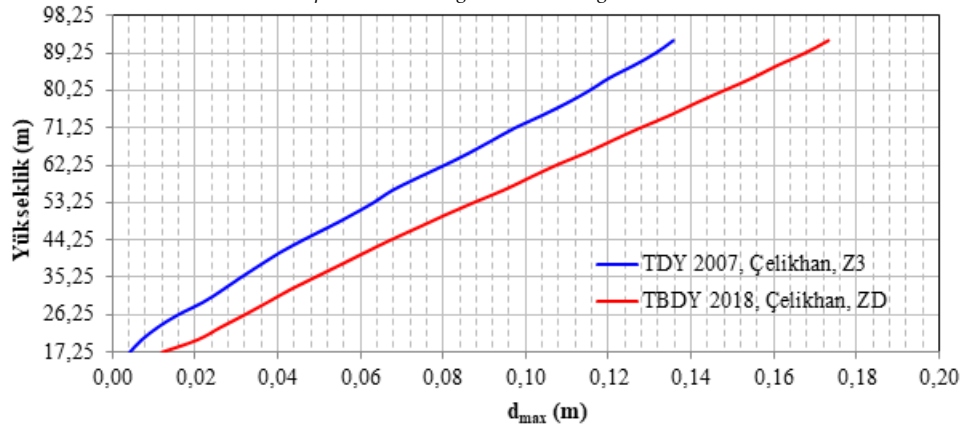
Şekil 8. Adana Lokasyonunda Yapının X ve Y yönleri için elde edilen maksimum tepe deplasmanları

Figure 8. Maximum peak displacements obtained for the X and Y directions of the structure in Adana Location



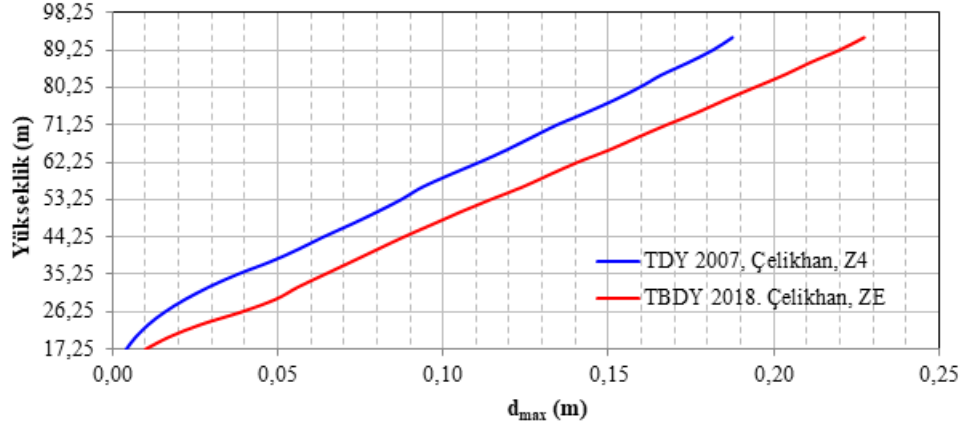
a) Z1 ve ZA zemin sınıflarına göre karşılaştırma

a) Comparison according to Z1 and ZA ground classes



b) Z3 ve ZD zemin sınıflarına göre karşılaştırma

b) Comparison according to Z3 and ZD ground classes



c) Z4 ve ZE zemin sınıflarına göre karşılaştırma

c) Comparison according to Z4 and ZE ground classes

Şekil 9. Adıyaman Lokasyonunda Yapının X ve Y yönleri için elde edilen maksimum tepe deplasmanları

Figure 9. Maximum peak displacements obtained for the X and Y directions of the structure in Adıyaman Location

BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada 2007 ve 2018 deprem yönetmelikleri, yapılan analizlerden elde edilen taban kesme kuvveti ve maksimum tepe deplasmanı gibi büyüklükler esas alınarak karşılaştırılmış ve her iki yönetmeliğe göre yapı yüksekliğinin yapı davranışına etkisi irdelenmeye çalışılmıştır.

Literatürde mevcut olan bir yapı örneği, ETABS bilgisayar programında, başta 30 kat olarak modellenmiş ve yapılan her analiz sonrası 1 adet ara kat eksiltilerek 5 ile 30 katlar arasındaki 26 adet model için analizler tekrarlanmıştır. Yapının 15 metre ile 91 metre arasında değişen yüksekliklere sahip modelleri için Mod birleştirme yöntemine göre hesaplanmış olan taban kesme kuvveti ve maksimum tepe deplasmanı gibi büyüklükler kaydedilmiştir. Analizler, Adana ve Adıyaman illeri esas alınarak iki farklı deprem bölgesi için yapılmıştır.

2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerinin yerel zemin sınıflarını değerlendirirken farklı kriterleri esas almış olmaları nedeniyle, her iki yönetmeliğe göre yapılan analizlerin sonuçlarını sağlıklı olarak karşılaştırabilmek üzere bu çalışmada, yerel zemin parametrelerinin benzer seçilmesi amacıyla kayma dalgası hızı ve ortalama standart penetrasyon darbe sayısı gibi parametreler esas alınarak bir değerlendirme yapılmış olup 2007 yönetmeliğinde Z1, Z3 ve Z4 olarak verilen zeminlerin 2018 yönetmeliğinde sırasıyla ZA, ZD ve ZE olarak verilen zeminlere benzediği kabul edilmiştir. Grafikler her üç zemin sınıfı dikkate alınarak hazırlanmıştır ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

Şekil.6'da Adana lokasyonu için verilen taban kesme kuvveti değerleri kıyaslandığında, 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmektedir. Adıyaman lokasyonu için de oldukça benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7).

2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerleri, yapı yüksekliği arttıkça yaklaşık olarak sabit değerde kalırken, 2018 verileri için ise yapı yüksekliği arttıkça taban kesme kuvveti değerlerinin azaldığı gözlenmektedir (Şekil 6). Adıyaman lokasyonu için de oldukça benzer sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 7).

Bu sonuçlar, yapının X yönü periyotları dikkate alınarak hesaplanan X yönündeki taban kesme kuvveti değerleri için elde edilmiştir. Yapının Y yönü için de oldukça benzer sonuçlar elde edildiğinden Y yönü için hazırlanan taban kesme kuvveti değerlerine ait grafiklere çalışmada yer verilmemiştir.

2018 deprem yönetmeliğinde bina tabanına etkiyen toplam eşdeğer deprem yükü $V_{tE}^{(X)}$ (taban kesme kuvveti) aşağıdaki denklemde verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır. Burada m_t binanın toplam kütleini ve $S_{aR}(T_p^{(X)})$ ise azaltılmış tasarım spektral ivmesini göstermektedir.

$$V_{tE}^{(X)} = m_t S_{aR}(T_p^{(X)})$$

Yukarıda verilen denkleme göre, kat adedine bağlı olarak yapı yüksekliği arttıkça yapının kütlesi de artmaktadır. Bu durumda, taban kesme kuvveti değerlerinin de kütledeki artışa bağlı olarak artması gerekmektedir. Oysa 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen veriler, kütledeki artışa rağmen taban kesme kuvveti değerlerinin azaldığını, 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen veriler ise kütledeki artışa rağmen taban kesme kuvveti değerlerinin azaldığını göstermektedir. Bu durum azaltılmış tasarım spektral ivmesi $S_{aR}(T_p^{(X)})$ ile açıklanabilmektedir. Yapı yüksekliği arttıkça yapının kütlesi ile birlikte yapının periyodu da artmaktadır. Şekil 4'te verilen yatay elastik tasarım ivme spektrum grafiğinden görüleceği üzere, yapı periyodu pik nokta sınırları dahilinde artış gösterirken da iken $S_{aR}(T_p^{(X)})$ değeri sabit kalmakta ve taban kesme kuvveti değeri toplam kütleyle bağlı olarak artacaktır. Fakat yapı periyodunun, grafiğin pik nokta sınırını aşip parabolik kısmına geçmesi durumunda taban kesme kuvveti değerlerinin bu parabolik kısmın ani düşüşüne bağlı olarak azalabileceği veya sabit kalabileceği görülmektedir. Her iki deprem yönetmeliğinde farklı olarak verilmiş olan spektrum grafiklerine ait bu parabolik düşüşe bağlı olarak taban kesme kuvveti değerleri, 2007 yönetmeliği için yaklaşık olarak sabit kalırken 2018 yönetmeliği için ise azalış göstermektedir.

Şekil 8'de Adana lokasyonu için elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerini gösteren grafikler verilmektedir. 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen deplasman değerlerinin, 2007 yönetmeliği esas alınarak elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Tepe deplasmanlarının taban kesme kuvveti ile ilişkili olması nedeniyle böyle bir sonuç elde edilmiş olması beklenen bir durumdur. Fakat burada spektrum faktöründen başka, 2018 deprem yönetmeliğinde verilen etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapı rijitliğinin azaltılması hususunun da etkisi dikkate alınmalıdır.

Şekil 9’da verilen ve Adıyaman lokasyonu için elde edilmiş olan maksimum tepe deplasmanı değerlerini gösteren grafiklerde, bu etkinin belirgin bir şekilde ortaya çıktığı gözlenmektedir. Her iki yönetmeliğe göre hesaplanan taban kesme kuvveti değerlerinin birbirine yakın olması halinde, 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinin 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmektedir.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, TBDY 2018 ve TDY 2007 kapsamında bina yüksekliğinin, bina tabanında oluşacak toplam eşdeğer deprem yükü (taban kesme kuvveti) üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak irdelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Gerek Adana gerekse Adıyaman lokasyonları için yapılan analizlerde, 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinden çok daha düşük değerler aldığı gözlenmiştir. Bu sonucun elde edilmesinde, 2018 deprem yönetmeliğinde esas alınan ve 2018 yılında güncellenmiş olan Türkiye Deprem Tehlike Haritasının etkili olduğu değerlendirilmektedir.

Analizlerde, 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin, yapı yüksekliği arttıkça yaklaşık olarak sabit değerde kaldığı, 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin ise yapı yüksekliği arttıkça doğrusal olarak azaldığı gözlenmiştir. Bu sonucun elde edilmesinde, yine 2018 deprem yönetmeliğinde esas alınan yeni tasarım ivme spektrum değerlerinin etkili olduğu değerlendirilmektedir.

2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen deplasman değerlerinin, 2007 yönetmeliği esas alınarak elde edilen değerlere kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Fakat Z4 (2007 deprem yönetmeliği yerel zemin sınıflandırma sistemine göre) ve ZE (2018 deprem yönetmeliği yerel zemin sınıflandırma sistemine göre) gibi daha zayıf zeminler dikkate alındığında her iki yönetmeliğe göre hesaplanan taban kesme kuvveti için birbirine yakın değerler elde edilebilmektedir. Taban kesme kuvveti değerlerinin yakın olması halinde, 2018 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinin 2007 deprem yönetmeliği esas alınarak elde edilen maksimum tepe deplasmanı değerlerinden çok daha büyük olduğu gözlenmiştir. Tepe deplasmanları ile ilgili olarak böyle bir sonucun elde edilmesinde, 2018 deprem yönetmeliğinde verilen etkin kesit rijitlikleri kullanılarak yapı rijitliğinin azaltılması hususunun etkili olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Computers and Structures, INC., 2005. CSI Analysis Reference Manual For Sap 2000, Etabs And Safe. 1995 Avenue Berkeley, California 94704 USA, 415s. www.computersandstructures.com
- Çetin, K., Demir, A., Altıok, T.H., 2020, “2007 ve 2018 Türk deprem yönetmeliklerine göre yerel zemin sınıflarının yapılardaki burulma düzensizliğine etkisi”, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt. 8, Sayı. 2, ss. 282-290
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007.
- Koçer, M., Nakipoğlu, A., Öztürk, B., Al-Hagri, M. C., Arslan, M. H., 2018, “Deprem kuvvetine esas spektral ivme değerlerinin TBDY 2018 ve TDY 2007’ye göre karşılaştırılması”, Selçuk Teknik Dergisi, Cilt. 17, Sayı. 2, ss. 43-58
- Nemutlu, Ö.F., Sarı, A., 2018, “Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik 2007 ile Türkiye bina deprem yönetmeliği 2018’in karşılaştırılması”, International Engineering, Science and Education Conference (INESEC), Diyarbakır, 569-575, 14-17 Kasım 2018.
- Öztürk, M., 2018, “2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ve Türkiye Deprem Tehlike Haritası ile ilgili İç Anadolu bölgesi bazında bir değerlendirme” Selçuk Teknik Dergisi, Cilt. 17, Sayı.2, ss.31-42

- Öztürk, M., Selekoğlu, E. S., Baran, T., “Eşdeğer deprem yükü bakımından TBDY-2019 ile DBYBHY-2007 kıyaslaması” International Conference on Innovation, Sustainability, Technology and Education in Civil Engineering (iSTE-CE'2019), Hatay, 1157-1167, 13-15 Haziran 2019.
- Pampal, S., Özmen, B., “Türkiye Deprem bölgeleri haritalarının gelişimi”, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 105-115, 16-20 Ekim 2007,
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, <https://tdth.afad.gov.tr/>, 2018.
- Ünsal, İ., 2013, *Türk deprem yönetmeliğinde verilen deprem analiz yöntemlerinin yapı geometrisine bağlı olarak irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.



YAPI ÜRETİM SÜRECİNDEKİ İŞ KAZALARI ŞİDDETİNİN ÖN BİLGİLENDİRİLMİŞ YAPAY ÖĞRENME METODU İLE TAHMİNİ

¹Mustafa TÜRKER , ²Recep KANIT 

^{1,2}Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara

¹mustafa.turker@gazi.edu.tr, ²rkanit@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 06.07.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 25.08.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, yapı üretim sürecinde meydana gelen iş kazalarında, kaza şiddeti ile kaza önlemleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bunun için geçmiş kaza verileri kullanılarak, ilerideki iş kazalarında hangi önlemlerin alınması gerektiği ve bu önlemlerin alınmaması halinde kaza sonucunun ne olabileceğini tahmin edebilen bütünleşmiş bir model geliştirilmiştir. Bu tahmin modeli, günümüzde araştırmacıların sıklıkla kullandığı AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) ve YSA (Yapay Sinir Ağları) metotlarının zayıf kaldıkları noktada birbirlerini tamamlaması amacıyla, birbirine entegre edilerek oluşturulmuştur. Modelin anlamlılığı bir saha çalışması yapılarak gerçek veriler ile test edilmiştir. Örneklem için en çok ölümlerle sonuçlanan 4 (dört) tür iş kazası seçilmiş ve bu iş kazaları için, aynı kurumda, 35 (otuz beş) geçmiş kaza verileri toplanmıştır. YSA metodu giriş katmanını önceden anlamlandıran AHP metodu için ikili kıyaslama verileri, profesyonel bir anket firması tarafından sektörde görev yapan İSG (İş sağlığı ve güvenliği) uzmanlarından, anket yöntemi ile elde edilmiştir. Elde edilen bu verilerden 120 adedi ağların eğitilmesinde, 20 adedi de test edilmesinde kullanılmıştır. Sonuçta risk azaltıcı önlemler ile kaza şiddeti arasında ilişkinin, toplanan kaza verileriyle sınırlı olmak kaydıyla, %90 oranında anlamlı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İş Kazaları, Yapay Sinir Ağları, Tahmin Modeli, İnşaat Sektörü, ÖBYÖM

Estimation of the Severity of Occupational Accidents in the Building Process with Pre-Informed Artificial Learning Method

ABSTRACT: In this study, the relationship between accident severity and accident measures in the occupational accidents that occurred during the building process was investigated. By using past accident data, an integrated model has been developed which can predict what measures should be taken in future occupational accidents and what the outcome of the accident would be if these measures are not taken. This estimation model was developed by integrating the AHP (Analytical Hierarchy Process) and ANN (Artificial Neural Networks) methods, which are frequently used by researchers, to complement each other at the point where they are weak. The significance of the model was tested with real data by conducting a field study. For the sample, 4 (four) types of occupational accidents that caused the most deaths were selected, and 35 (thirty-five) past accident data were collected for each of these occupational accident types. For AHP method, which weighting the input layer of the ANN method, the binary comparison data was obtained through the survey method from the OHS (Occupational Health and Safety) experts working in the sector by a professional survey firm. From the data obtained, 120 data were used to train network, 20 data were used to test it. As a result, the relationship between risk reducing measures and accident severity was found to be 90% significant, provided that it is limited to the accident data collected.

Key Words: Occupational Accidents, Artificial Neural Networks, Prediction Model, Construction Sector, PIAIM

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Konunun Önemi (Importance of the Subject)

Yapı üretim süreci birçok belirsizlik ve doğal olarakta yüksek riskler içerir. Bununla birlikte aynı oranda da yüksek getiri sağlar. Yapı üretimi için, birçok farklı disiplinlerden çalışanlar bir araya gelmekte ve bu üretim İSG bakımından çok tehlikeli sınıfta değerlendirilmektedir.

İş kazaları sektörel açıdan incelendiğinde, T. C. Sosyal Güvenlik Kurumu istatistiklerine göre 2015 ve 2018 yılları arasında iş kazası sonucu yaşamını yitiren sigortalılardan bütün sektörler içerisinde inşaat sektörünün payı 2147 kişi ile %36,8 olmuştur. Ölümlü olmayan iş kazaları neticesinde, yatarak ve ayakta tedavi görülmesi ile kaybedilen iş günü sayısı için bütün sektörler içerisinde inşaat sektörünün payı, 2015 ve 2018 yılları arasında 2.630.513 gün ile %20,3 olarak kayıtlara geçmiştir (Sosyal Güvenlik Kurumu, 2018). Görüldüğü üzere ülkemizdeki iş kazalarının, özellikle ölümlü iş kazalarının büyük bir kısmı inşaat sektöründe meydana gelmektedir.

Literatür Özeti (Literature Review)

İnşaat sektöründe iş sağlığı ve güvenliği alanında 2010-2019 yılları arasında SCI ve SCI-EXPANDED indekslerinde 1000 'e yakın yayın yapılmış olup, her yıl yayın sayısı ortalama %15 artmıştır. Bu yayınlardan 44 tanesi Türkiye kaynaklıdır (Clarivate Analytics, 2020). Bu çalışmalardan konumuzla doğrudan ilgili olanlar aşağıda gösterilmiştir.

Aminbakhsh vd. (2013) yapmış oldukları çalışma ile AHP metodu ve Güvenlik Maliyeti teorisine dayalı bir risk değerlendirme çerçevesi önermişlerdir. Çalışmada her kazaya, kendi grubu içerisinde hiyerarşik olarak ağırlık kazandırılmış ve önlem maliyeti ile kaza maliyetinin kesiştiği optimum bütçe aranmıştır. Gurcanli vd. (2015), ticari bir yazılım kullanarak 30 farklı yapının aktiviteleri üzerine belirlemiş oldukları riskleri tanımlayarak proje maliyetine göre bir güvenlik maliyeti oranı elde etmişlerdir.

Yılmaz ve Kanit (2018), yapmış oldukları çalışmada mevzuata uygun olarak şantiyede alınması gereken bütün önlemleri işçilik bazında maliyet olarak yansıtmayı başarmışlar ve kendilerinin geliştirdiği yazılım ile başka bir yazılıma ihtiyaç duymadan uygulamaya geçirmişlerdir. Çok detaylı olarak yapılan bu çalışmada; doğrudan tek bir oran yerine, imalat grubuna göre mevzuatın gereklilikleri sonucu oluşan maliyetler doğru bir şekilde proje bütçesine hiyerarşik olarak yansıtılmıştır.

İlbarhar vd. (2018) literatürden farklı olarak Pisagor Bulanık Orantılı Risk Değerlendirme yöntemini ortaya koymuşlar ve birçok metodu bu yöntemde birleştirerek bir inşaat projesinin kazı işlerine uygulayarak sonuçlarının diğer yöntemlere göre daha tutarlı olduklarını göstermişlerdir.

Pinto vd. (2012), hiçbir kişisel önlem alınmayacağı varsayılan bu çalışmada; literatürden belirlemiş oldukları kaza türleri için bulanık küme teorisini kullanarak, her kaza türü için ayrı ayrı ilgili parametreleri belirlemişler, insan vücudunun kısımları için biyomekanik sınırları kullanarak kazanın şiddetini tahmin eden bir yöntem ortaya koymuşlardır.

Mohammadfam vd. (2015), çalışmalarında sağlığı tehdit eden iş kazalarında ilgili faktörleri değerlendirerek kazaların şiddetini tahmin edebilen bir model ortaya koymuşlardır. Çalışmada Kaba Küme Teorisi ve YSA yöntemleri ayrı ayrı kullanılmış olup, YSA yönteminin büyük ölçekli projelerde daha güvenilir olduğu ortaya konulmuş ve iki yöntemin birlikte kullanılmasının çok daha iyi sonuçlar verebileceği gösterilmiştir.

Alizadeh vd. (2015) İran inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarında Bayesian Ağlarını kullanarak kaza şiddetinin olasılığını araştırmışlardır. Çalışmada yaş, evlilik durumu, iş deneyimi, geçmiş kaza deneyimi faktörlerini kullanarak bir tahmin ağı geliştirilmiştir.

Bu çalışmaya konu olan metoda benzer olarak Li vd. (2012), YSA ve Bulanık AHP metotlarını birlikte kullanarak bir ekipmanda hataya sebep olan risk unsurlarını değerlendirmişlerdir. Her unsur için 15 adet geçmiş veri ağın eğitilmesi için, 5 adet veri de ağın test edilmesi için kullanılmıştır. Bu model ile karmaşık haldeki risk değerlendirme problemi basite indirgenmiş ve daha isabetli bir model

geliştirilmiştir. Benzer bir metot Gomathi ve Shanmuga Priyaa (2017) tarafından koroner kalp hastalığı teşhisi için geliştirilmiştir. Bu çalışmada dört tür metot kıyaslanmıştır; Optimize Edilmiş Yarı Parametrik Genişletilmiş Derin Dinamik Bayesian Ağı, ikinci metot birinci metodun AHP ile entegre edilmiş hali, üçüncü metot Genişletilmiş Dinamik Bayesian Ağı ve dördüncü metot Optimize Edilmiş Yarı Parametrik Genişletilmiş Dinamik Bayesian Ağı. Çalışma neticesinde AHP destekli yapay öğrenme modeli diğer yöntemlere göre çok daha isabetli görülmüş ve F1 skoru 0,97 olmuştur.

MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Çalışma evreni, bir inşaat şirketi kapsamında meydana gelen iş kazaları olarak sınırlandırılmıştır. Bu sınırlandırmanın ana sebebi güvenlik iklimi ve güvenlik kültürü kavramlarıdır. Bu kavramların güvenlik davranışına etkisi olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur (Karadal vd., 2019). Güvenlik iklimi; kurum veya kuruluşun güvenliğiyle alakalı, çalışanların işyerlerindeki çalışma ortamları ile ilgili sahip oldukları bilgilerin toplamıdır (Zohar, 1980). Güvenlik kültürü, kurum kapsamında tarafları tehdit eden tehlikelere ve durumlara karşı uygulanması planlanan eylem, plan, inanç, norm, tutum vb. değerler bütünü olarak ifade edilmiştir (Cox ve Flin, 1998). Bu iki kavramın iş kazalarına etkisi kuruluş bazında değişmektedir ve anlaşılacağı üzere ciddi bir etkisi vardır. Her kuruluş, bu çalışma ile önerilen metodu kendi bünyelerinde faaliyete geçirerek kendi kuruluşlarına ait özel tahmin ağlarını oluşturabilirler.

Materyal (Material)

Bu çalışmada kullanılan iş kazası türleri SGK (Sosyal Güvenlik Kurumu) tarafından yayınlanan istatistik veriler ve uluslararası çalışmalarda kabuller esas alınarak belirlenmiştir. SGK yıllık istatistiklere göre Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında en fazla ölümlü kazaya sebep olan iş kaza türleri ve birçok uluslararası çalışmaya göre en çok ölümlü kazaya sebep olan 4 tür iş kazası, çalışma örnekleme olarak seçilmiştir. Bu çalışmalara göre, ölüm ile sonuçlanan ve en sık görülen iş kazası yüksekte düşmedir. Neredeyse her iki ölümlü iş kazasından birisi yüksekte düşme ile gerçekleşmiştir. Türkiye’de 2015 ile 2018 yılları arasında toplam 1114 çalışan düşme eylemi sonucu hayatını kaybetmiştir ve ölümlü iş kazalarında listenin başını çekmektedir (Sosyal Güvenlik Kurumu, 2018). İkinci olarak en fazla ölümün gerçekleştiği kaza türü fırlatılan/düşen cisim çarpması, üçüncü olarak yapısal göçme ve son olarak elektrik çarpmasıdır. Bu dört iş kazası, bütün ölümlü iş kazalarının %85’in den fazlasını temsil etmektedir (Chen vd., 2020; Gurcanli ve Mungen, 2013; Hamid vd., 2019; Meng vd., 2018; Shafique ve Rafiq, 2019; Sosyal Güvenlik Kurumu, 2018; Winge ve Albrechtsen, 2018; Winge vd., 2019).

Seçilen iş kazaları ve inşaat sektöründe en sık gerçekleştiği imalat grupları Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışmaya konu olan iş kazaları ve seçilen ilgili imalat grupları

Table 1. Occupational accidents and related work groups subject to the study

İş Kazası Türü	Seçilen İlgili İmalat Grubu
Yüksekte Düşme	Cephe İmalatları
Fırlatılan/Düşen Cisim Çarpması	İskele Kurulum/Söküm İmalatları
Yapısal Göçme	Kalıp İmalatları
Elektrik Çarpması	Donatı İmalat ve Montaj İmalatları

Belirlenen bu iş kazası türlerine dair bir şirketin geçmiş verileri sağlanmıştır. Şirket bu verileri, şirket isminin açıklanmaması kaydıyla verdiği için burada ismi verilememiştir.

Birinci aşamada örneklem olarak seçilen kazalarda risk azaltıcı önlemler AHP yöntemi ile ağırlıklandırmak amacıyla kıyaslama matrisleri, ikili kıyaslama sorularına dönüştürülmüştür. Bu aşamada kullanılan veriler Bilimsel Anketler firmasınınca, inşaat sektöründe görev yapan İSG uzmanlarına anketler uygulanarak sağlanmıştır. Uygulanan anketlerden örnek bir ekran görüntüsü aşağıda Şekil 1’de gösterilmiştir.

Cephe İmalatlarında Yüksekten Düşmeye karşı Toplu Koruyucu Önlem Yöntemleri

Cephe İmalatlarında herhangi bir sebepten dolayı yüksekten düşerek meydana gelen iş kazaları

5. Aşağıdaki Toplu Koruma Önlem yöntemleri arasında ilgili imalat grubu ve kaza türüne göre kıyaslama yapınız.

İmalat Grubu: Cephe imalatları
Kaza Türü: Yüksekten düşme
(Cephe İmalatlarında herhangi bir sebepten dolayı yüksekten düşerek meydana gelen iş kazaları)

(1) nolu önlem GÜVENLİK HALATI, YAŞAM HATTI SİSTEMİ
(2) nolu önlem KORKULUK SİSTEMLERİ

(1) nolu önlem yöntemi (2) nolu önlem yöntemine kıyasla ne derece önemlidir (Not: sadece ikisi arasında kıyaslama yapınız) *

Kesin hakir (1), Çok hakir (2), Hakir (3), Az hakir (4), Eşit önem (5), Az üstün(6), Üstün (7), Çok üstün (8), Kesin üstün (9)

Kesin Hakir 1 2 3 4 5 6 7 8 9 Kesin Üstün

Şekil 1. İkili kıyaslama değerlerinin anket yöntemi ile elde edilmesi

Figure 1. Obtaining binary comparison values by using survey method

4 kaza tipi için toplam 109 adet form doldurtulmuş ve her biri için tutarlılık analizi yapılmıştır. Yetersiz gelen 84 adet anket elenmiştir. Kalan 25 anket değerleri için ortalama alınarak tekrar tutarlılık analizine sokulmuş ve verilerin tutarlılığı hem kendi anketi içerisinde hem de ortalama bazında ispatlanmıştır.

Metot (Method)

İş kazalarında, kaza şiddeti ile alınan önlemler arasındaki ilişkiye cevap arayan bu çalışmanın türü öngörücü ilişileşim araştırmasıdır. Koruyucu ekipman ve önleyici faaliyetlerin eksik olması, iş kazalarında ölüme sebebiyet verebilir. Diğer yandan her ölüm ile sonuçlanan iş kazasında tek sebep koruyucu ekipman ve faaliyetlerin eksikliği olmayabilir. Üçüncü veya dördüncü bir dış etken her zaman için ihtimal dahilindedir. Ayrıca bu çalışma kapsamında kazaların gerçekleşme ihtimalleri değil, kaza olayı gerçekleştiği takdirde şiddetinin nasıl olacağını ilişikisi araştırılmıştır.

Ön Bilgilendirilmiş Yapay Öğrenme Metodu (PIAIM) (Pre-Informed Artificial Intelligence Method)

Öğrenme, ders çıkarma, çıkarsama yapma yetenekleri, doğada fiziksel olarak en güçlü olmasa bile insanoglunu diğer bütün canlılardan üstün kılmıştır. Basit olarak öğrenme eylemi, etkiye karşı oluşan tepkinin hafızada saklanması olayı olarak düşünülebilir. Bazen bir tepkinin oluşabilmesi için birden fazla etkinin oluşması, hatta bu etkilerin belirli ölçeklerde olması bile gerekebilir.

Bu çalışmada etkiyi temsil eden giriş parametreleri olarak şantiyelerde alınması gereken önlemler, tepki olarak kazalarının ne şiddette sonuçlandığı değerlendirilmiştir. Bu metodun uygulanabilmesi için başlangıçta bazı kabuller yapılmalıdır. Şantiyelerde alınması gereken önlemler Yılmaz ve Kanit (2018) tarafından yönetmeliklere uygun olarak 3 ana grupta derlenmiştir. Bu gruplar ve alt öğeleri Çizelge 2 'de gösterilmiştir.

Çizelge 2. İş kazalarında risk azaltıcı önlemler (Yılmaz ve Kanıt, 2018)*Table 2. Risk reducing measures in occupational accidents*

Toplu Koruma Yöntemleri (TKY)	Kişisel Koruyucu Donanımlar (KKD)	Kontrol, Eğitim, Muayene (KEM)
(TKY-1) Şantiye alanı perde sistemi (TKY-2) Renkli kazı filesi (TKY-3) Güvenlik halatı, yaşam hattı sistemi (TKY-4) Korkuluk sistemleri (TKY-5) Cephe örtüleri (TKY-6) Güvenlik alan perdesi (TKY-7) İlk yardım çantası, yangın tüpü (TKY-8) Dış cephe güvenlik ağı (TKY-9) Seyyar elektrik dağıtım panosu (TKY-10) Uyarıcı ve bilgilendirici levhalar	(KKD-1) Baret (KKD-2) Koruyucu gözlük (KKD-3) Toz maskesi (KKD-4) Yüz siperi (KKD-5) İş elbisesi (KKD-6) Reflektör (KKD-7) Paraşüt t. Emniyet kemeri (KKD-8) İş ayakkabısı (KKD-9) Koruyucu eldiven	(KEM-1) İSG uzmanı (KEM-2) İş yeri hekimi (KEM-3) Muayeneler (KEM-4) İSG eğitimleri

İş kazalarında kaza şiddeti dört sınıf olarak kabul edilmiştir ve Çizelge 3 'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. İş kazalarında kaza şiddet sınıfları*Table 3. Accident severity classes in occupational accidents*

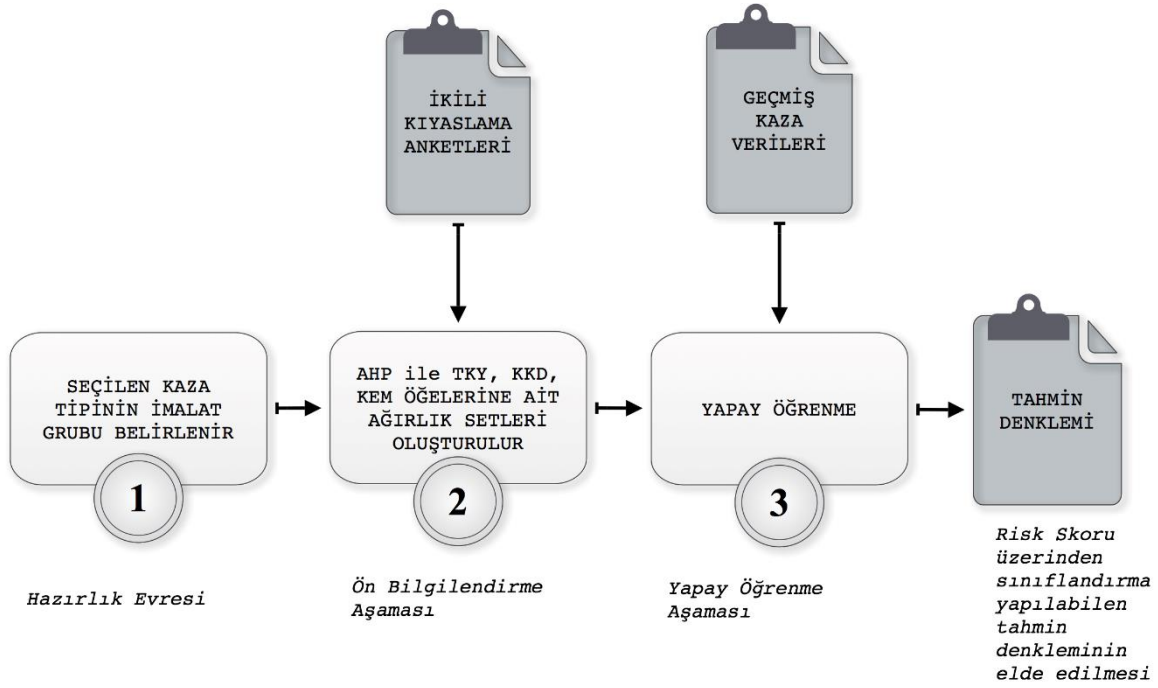
Kaza şiddet sınıfı	Açıklama
Sıyrık	Ayakta tedavi ile atlatılan ufak çaplı kazalar, 1 günü geçmeyen iş günü kaybı.
Hafif Yaralanma	Meydana gelen hasar ile geçici iş göremez hale getiren kazalar, tedavi sonrası işe geri dönülür.
Ağır Yaralanma	Yatarak tedavi gerektiren ve alınan hasar ile kalıcı iş göremez hale gelen kazalar
Ölüm	Çalışanın hayatına son veren kazalar

Çizelge 2 'de bahsedilen 33 risk azaltıcı önlemlerin, Çizelge 3 'de belirtilen 4 tür kaza şiddetine olan etkilerinin öğrenilmesi klasik YSA metodu ile yapılmaya çalışılırsa, giriş katman parametrelerinin (33 adet), çıkış katmanı parametrelere (4 adet) bağlantılarının anlam kazanması için her örneklem için en az 1000 veri gerekli olacaktır. Böyle bir yaklaşım uygulanması çok güç ve zaman alan bir yöntem olurdu. Bu noktada geçmiş veri sayısını uygulanabilir seviyelere indirmek ve yapay öğrenme ağının yükünü azaltmak amacıyla ikinci bir metot giriş katmanını anlamlandırmak amacıyla çalışmaya katılmıştır.

Klasik yaklaşımda örneğin düşen cisim çarpması kazasına karşı, toz maskesi ve baret eşit önemde öğrenme ağına giriş yapar ve geçmiş kaza verileri ile ilişkilendirildikçe, düşen cisimlerde baretin, toz maskesine karşı daha koruyucu olduğu ortaya çıkarken, yapılan bu ön işleme adımı ile bu bilgi öğrenme ağına başta verilmektedir. Bu sayede ihtiyaç duyulan geçmiş veri sayısı ciddi oranda azalmakta ve daha sağlıklı bir öğrenme yapısı ortaya çıkmaktadır.

Kaza anında alınmış önlemlerin kaza neticeleri ile ilişkilendirilmesi ve yorumlanabilmesi için sözcükler ile ifade edilen giriş ve çıkış parametreleri sayısal değerler ile ifade edilmiştir. Kaza neticelerinin sayısal olarak ifadesi, 0-100 arasında değişebilen Risk Skoru isimli bir değişken ile ifade edilmiştir.

Risk Skoru, 0-25 aralığında Sıyrık, 25-50 aralığında Hafif Yaralanma, 50-75 aralığında Ağır Yaralanma, 75-100 aralığında Ölüm olacak şekilde ayarlanmıştır. Öğrenme ağı kendini bu aralıklara göre kalibre edeceğinden eşit şekilde aralıkları bölmek yeterli olmuştur. Modelin ana iki aşaması vardır, bunlar ön bilgilendirme ve yapay öğrenme aşamalarıdır (Şekil 2).



Şekil 2. PIAIM metodu uygulama aşamaları

Figure 2. Execution stages of PIAIM method

Ön Bilgilendirme Aşaması (Pre Informing Stage)

Bu aşama, giriş parametreleri olan risk azaltıcı önlemlerin ilgili örneklem kapsamında kendi grupları içerisinde değerlendirilip ağırlık kazandırılmasını kapsamaktadır. Bu işlem için AHP metoduna ait kıyaslama matrisleri ve hesaplama yöntemleri kullanılmıştır. Bu sayede sayısal değerler ile ifade edilebilmiştir.

AHP metodunda kullanılan ikili kıyaslama ölçekleri Çizelge 4 'de verilmiştir.

Çizelge 4. Kıyaslama ölçekleri ve açıklamaları (Saaty, 1980)

Table 4. Comparison scales and explanations

Ölçek	Tanım	Kıyaslama Açıklaması
1	Eşit derecede önemli	İki kriter eşit önemdedir
3	Az üstün	Kriterlerden birinin tecrübe ve yargıya dayanan biraz üstünlüğü vardır
5	Üstün	Kriterlerden birinin tecrübe ve yargıya dayanan çokça üstünlüğü vardır
7	Çok Üstün	Kriterlerden biri diğerine göre üstün sayılmıştır
9	Kesin Üstün	Bir kriterin diğerinden üstün olduğunu gösteren kanıt çok büyük güvenirliliğe sahiptir
2, 4, 6, 8	Ara değerler	Uzlaşabilmek amacıyla kullanılacak ara değerlerdir

AHP metodu ile kriterleri değerlendirmek için öncelikle ilgili grubun öğeleri ile Çizelge 5 'de gösterildiği gibi ikili karşılaştırma matrisinin oluşturulması gerekir.

Çizelge 5. Risk azaltıcı önlemler için grup içi karşılaştırma matrisi*Table 5. In-group comparison matrix for risk reducing measures*

	Önlem 1	Önlem 2	Önlem 3	Önlem n
Önlem 1		a_{12}	a_{13}	a_{1n}
Önlem 2	$1/a_{12}$		a_{23}	a_{2n}
Önlem 3	$1/a_{13}$	$1/a_{23}$		a_{3n}
Önlem n	$1/a_{1n}$	$1/a_{2n}$	$1/a_{3n}$	

Tabloda a_{ij} olarak ifade edilen değer, i. önlemin j. önleme göre önem derecesini ifade eden sayısal ölçektir. Bu ölçek değerleri meslekte uzman kişiler tarafından veya güvenilir kaynaklar tarafından seçilmelidir. Bunu kolaylıkla yapabilmek için kıyaslama soruları ile anketler oluşturularak uzman kişilere doldurtulabilir. Bütün matris aynı kişi tarafından doldurulmalıdır. Örneğin, cephe imalatlarında yüksekte düşme riski için dış cephe ağırları, ilk yardım çantasına kıyasla ne derece önemlidir? Bu şekilde ikili olarak hazırlanacak sorulardan oluşan anketler kişilere doldurtularak kıyaslama ölçekleri elde edilebilir. Elde edilen değerler matriste yerlerine yazılır ve her kolon için alt toplam alınır. Ardından bütün matris değerleri kendi alt toplamlarına (S_i) bölünerek normalize edilir (Çizelge 6). i. kriterin (C_i) ağırlığı (w_i) matriste i. sıranın aritmetik ortalamasının alınması ile elde edilir.

Çizelge 6. Karşılaştırma matrisinin normalize edilmesi*Table 6. Normalization of comparison matrix*

	C_1	C_2	C_3	C_n	
C_1	a_{11}/S_1	a_{12}/S_2	a_{13}/S_3	a_{1n}/S_n	w_1
C_2	a_{21}/S_1	a_{22}/S_2	a_{23}/S_3	a_{2n}/S_n	w_2
C_3	a_{31}/S_1	a_{32}/S_2	a_{33}/S_3	a_{3n}/S_n	w_3
C_n	a_{n1}/S_1	a_{n2}/S_2	a_{n3}/S_3	a_{nn}/S_n	w_n

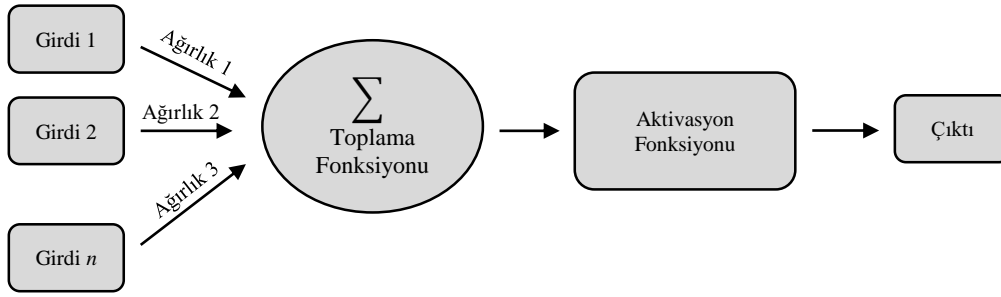
$$S_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

$$w_i = \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} \right) / n \quad (2)$$

AHP yöntemi ile değerlendirilmiş olan kriterler ve karşılaştırma matrisi tutarlılık analizi neticesinde kabul edilebilir seviyede kalıyor ise ($CR < 0,1$) elde edilen ağırlıklar kullanılabilir demektir (Saaty, 1980). Ön bilgilendirme aşaması neticesinde ilgili kaza için TKY, KKD ve KEM öğelerine ait ağırlık setleri oluşturulmalıdır.

Yapay Öğrenme Aşaması (Artificial Learning Stage)

Yapay öğrenme aşaması beynimizin öğrenme aşamalarını taklit eder. Nasıl ki beynimizdeki öğrenme faaliyeti sinir hücreleri vasıtasıyla yapılıyorsa, yapay öğrenme faaliyeti de yapay sinir hücreleri ile yapılmaktadır. Mühendislik biliminde yapay sinir hücreleri, proses elamanları ismi ile adlandırılmaktadır (Öztemel, 2006). Şekil 3 'de yapay bir sinir hücresi ve elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3. Bir yapay sinir hücresinin yapısı

Figure 3. The structure of an artificial neuron cell

Bu çalışmada girdiler risk azaltıcı önlemlerin grup toplamları ve çıktılar kaza şiddeti sınıflaması olmaktadır. Öğrenme ağı ile tahmin edilecek şiddet sınıfı risk skoru değişkeni ile ifade edilmektedir. Risk skoru değişkeni ise yapılan kabul neticesinde değeri arttıkça 0-25 arasında sıyrık, 25-50 arasında hafif yaralanma, 50-75 arasında ağır yaralanma, 75-100 arasında ölüm sınıflarını temsil etmektedir. Bir kaza anında alınabilecek 3 grup risk azaltıcı önlem grubu vardır. Bir grup için eğer bütün önlemler alınmış ise 1, hiçbir önlem alınmamış ise 0, bazı önlemler alınmış ise alınan önlemlerin bir önceki bölümden elde edilen ağırlıkları toplamı olmaktadır. Bu durumda Risk Skoru (RS) denklemi aşağıdaki gibi 3 alt skorun birleşiminden oluşmaktadır;

$$RS = RS_{TKY} + RS_{KKD} + RS_{KEM} \quad (3)$$

RS_{TKY} , risk azaltıcı önlem gruplarından toplu koruma grubunun temsil ettiği, kaza anında alınmış toplu koruma yöntemlerinin ağırlıklarından oluşturulmuş risk skorudur. Benzer şekilde RS_{TKY} ve RS_{KEM} bileşenleri de kendi gruplarında kaza anında alınmış önlemler sonucu oluşmuş risk skorlarıdır. Kaza anında alınmış önlemlerin ağırlıkları w_i ve bu ağırlıkların toplamı S_{GRUP} ile gösterilirse, RS_{TKY} ; kaza anında toplu koruma yöntemleri grubu için 0 ile 1 arasında değişen, 0 olması durumunda hiç önlem alınmamış, 1 olması durumunda bütün önlemlerin alındığı ve ara değerler de alınan önleme göre değiştiği Toplu Koruma Yöntemlerini temsil eden toplama fonksiyonu olmaktadır. Benzer şekilde S_{KKD} ve S_{KEM} kaza anında alınan önlemlerin ağırlıkça toplamını ifade eden toplama fonksiyonlarıdır.

$$S_{GRUP} = \sum_{i=1}^n w_i \quad (4)$$

Öğrenme ağına toplama fonksiyonları olan S_{TKY} , S_{KKD} , S_{KEM} , çıkış parametresi olan RS ile ters orantılıdır. Bir önlem grubunun bütün önlemleri kaza anında alınmışsa bu durum tehlikesiz olarak ifade edilebilirken aldığı değer 1 olmakta, hiçbir önlem almadığı durum çok tehlikeli olarak ifade edilirken aldığı durum 0 olmaktadır. Lakin RS için durum tam tersidir; çok tehlikeli bir durum varsa RS sayıca 100'e yakın, tehlikesiz bir durum varsa RS sayıca 0'a yakın olmaktadır. Bu durumu düzeltmek ve öğrenme ağının bağlantı ağırlıklarını aynı seviyeye getirmek amacıyla S_{GRUP} değerlerine yapay sinir hücresinde aktivasyon fonksiyonu kapsamında aşağıdaki bağıntı ile ön işleme yapılmıştır. Bu sayede tehlikeli durumu temsil eden 0; artık 10 ile, tehlikesiz durumu temsil eden 1; artık 0 ile gösterilebilmiştir.

$$W_{GRUP} = (1 - S_{GRUP}) * 10 \quad (5)$$

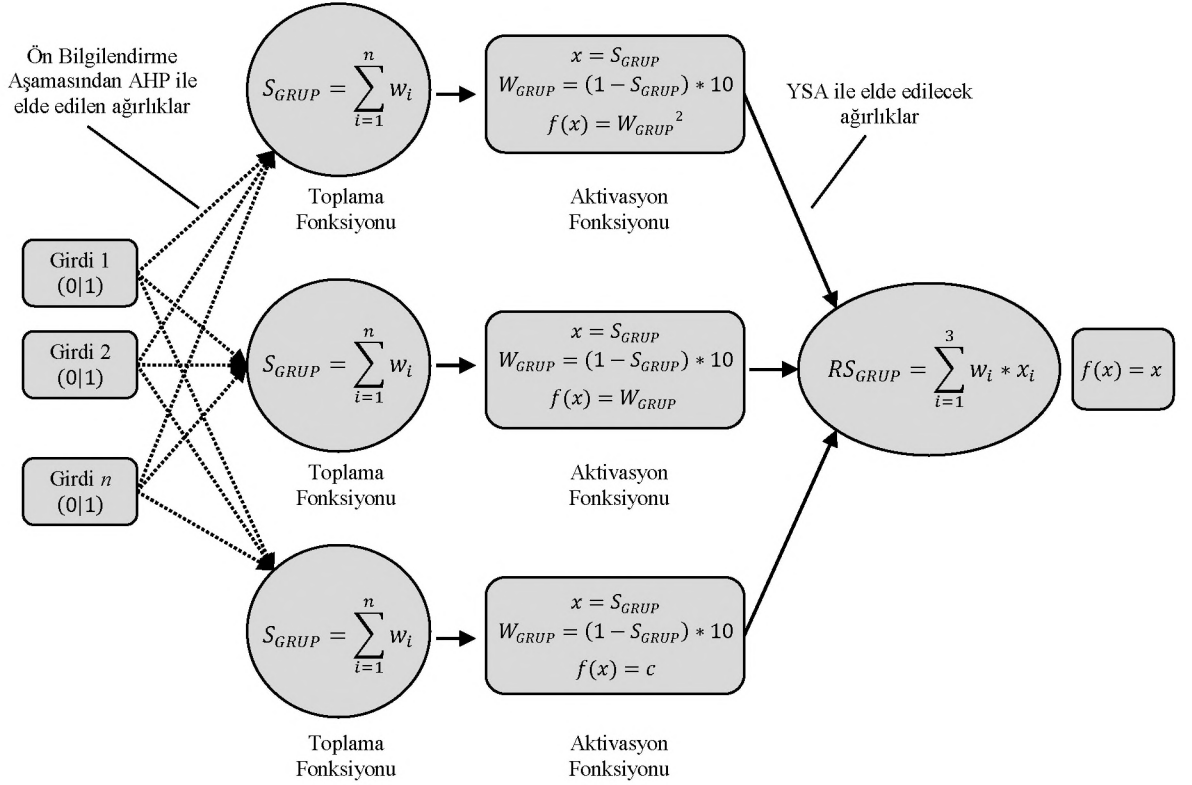
YSA doğrusal olmayan problemleri çözmek için tasarlanmıştır. Bir yapay sinir hücresinde kullanılan aktivasyon fonksiyonları probleme ne kadar doğrusal yaklaştığını gösterir. Eğer hücrelerin hepsinde aktivasyon fonksiyonu kullanılmaz veya olduğu gibi diğer katmana gönderilirse böyle bir durumda öğrenme ağı doğrusal bir çözüm aramaktan ileri geçemeyecektir.

Bu çalışmada giriş katmanını yorumlayan 3 tip sinir hücresi kullanılmıştır. Bu hücrelerin birisi $f(x) = x^2$ aktivasyon fonksiyonu kullanarak doğrusal olmayan davranışı ölçmektedir. İkinci tip ise $f(x) = x$ aktivasyon fonksiyonu kullanarak doğrusal ilişkiyi ölçmekte ve son olarak üçüncü tip hücre, girdiden bağımsız $f(x) = c$ aktivasyon fonksiyonu kullanarak, ilk iki hücre ile bir ilişki yakalayamadığı durumu ifade edecektir. Netice itibari ile ikinci derece bir denklemin bileşenleri sinir hücresi aktivasyon hücreleri olarak çalıştırılmasıyla öğrenme ağı kendi doğrusallık derecesini kendisi çıkarabilecektir. Benzer yaklaşımlar literatürde Evrişimsel Sinir Ağları olarak yüz tanıma ve sınıflandırma problemlerinde

kullanılmaktadır. Oluşturulan yapay sinir ağı mimarisi Şekil 4 'de gösterilmiştir. Bu durumda RS değeri alt bileşenleri RS_{GRUP} aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir. Bu denklemden α_{GRUP} , β_{GRUP} , C_{GRUP} ağı eğitilmesi sonucu oluşacak bağlantı ağırlıklarıdır. Bu 3 değişkenin geçmiş kazalara göre optimize edilmesi ve değerlerinin bulunması ile tahmin denklemi oluşmuş olacaktır.

$$RS_{GRUP} = \alpha_{GRUP} * W_{GRUP}^2 + \beta_{GRUP} * W_{GRUP} + C_{GRUP} \quad (6)$$

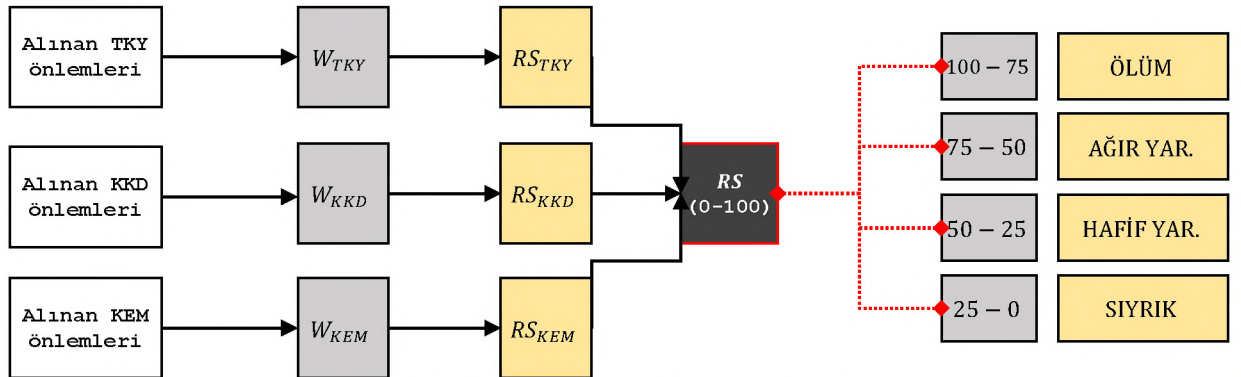
$$RS_{GRUP} = \alpha_{GRUP} * ((1 - S_{GRUP}) * 10)^2 + \beta_{TKY} * ((1 - S_{GRUP}) * 10) + C_{GRUP} \quad (7)$$



Şekil 4. PIAIM Modelinde kullanılacak YSA mimarisi

Figure 3. ANN architecture to be used in PIAIM Model

Geçmiş kaza verilerine göre ağırlıkların hesaplanmasında optimizasyon metodu olarak GRG-Nonlinear (Genel indirgenmiş gradyan) kullanılmış ve VBA (Visual Basic for Applications) programlama dili ile yazılım haline getirilmiştir (Lasdon vd., 1974). Her kaza için çözülecek problem Şekil 5 'deki gibi olmuştur.



Şekil 5. Yapay öğrenme ağına ait genel görünüm

Figure 4. General view of Artificially Learning Network

UYGULAMA (PRACTICE)

Sektörde uzun yıllar faaliyet göstermiş bir inşaat şirketi kapsamında bu çalışma uygulanmış ve tahmin denklemleri elde edilmiştir. Şirketin geçmiş kaza verilerinden faydalanılarak yürütülen bu uygulama çalışmasında, gizlilik politikaları gereği şirket unvanının açıklanmamasını şart koşulmuştur. Birinci aşamada örneklem olarak seçilen kazalarda risk azaltıcı önlemler AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Bu aşamada kıyaslama matrisleri, ikili kıyaslama sorularına dönüştürülmüş, Microsoft Forms uygulaması kullanılarak inşaat sektöründe çalışan İSG uzmanlarına doldurtulmuş ve uzmanların bütün bilgileri kayıt altına alınmıştır. Çizelge 7 'de örnek olarak cephe imalatlarında yüksekte düşme kazası için risk azaltıcı önlem ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 7. Cephe imalatlarında yüksekte düşme kazası için risk azaltıcı önlem ağırlıkları

Table 7. Risk-reducing measure weights for fall-off accidents in façade manufacturing

CR: 0.043	w	TOPLU KORUMA YÖNTEMLERİ	CR: 0.035	w	KİŞİSEL KORUYUCU DONANIMLAR	CR: 0.00	W	KONTROL, EĞİTİM, MUAYENE
TKY-3	0.398	Güvenlik halatı, yaşam hattı sis.	KKD-1	0.243	Baret	KEM-1	0.167	İsg uzmanı
TKY-4	0.185	Korkuluk sistemleri	KKD-2	0.050	Koruyucu gözlük	KEM-2	0.167	İş yeri hekimi
TKY-6	0.099	Güvenlik alan perdesi	KKD-3	0.044	Toz maskesi	KEM-3	0.167	Muayeneler
TKY-7	0.039	İlk yardım çantası, yangın tüpü	KKD-4	0.050	Yüz siperi	KEM-4	0.500	İsg eğitimleri
TKY-10	0.052	Uyarıcı ve bilgilendirici levhalar	KKD-5	0.093	İş elbisesi	-	-	-
TKY-5	0.102	Cephe örtüleri	KKD-6	0.044	Reflektör	-	-	-
TKY-8	0.126	Dış cephe güvenlik ağı	KKD-7	0.388	Paraşüt tip em. kemeri	-	-	-
-	-	-	KKD-8	0.045	İş ayakkabısı	-	-	-
-	-	-	KKD-9	0.045	Koruyucu eldiven	-	-	-

Ağırlık setlerinin elde edilmesinden sonra ikinci aşama olarak belirlenen kazaların her biri için 35 geçmiş kaza verisi toplanmıştır. Her geçmiş kaza verisi için iki bilgi gereklidir: birincisi kaza anında hangi risk azaltıcı önlemlerin olduğu, ikincisi kazanın nasıl sonuçlandığıdır. Her bir kaza türü için 30 veri ağırlıklandırılmasında, 5 veri test edilmesinde kullanılmıştır. Kalıp imalatlarında yapısal göçme riski için eğitilen öğrenme ağına ilişkin veriler Şekil 6 'da verilmiştir.

KAZA NO	S DEĞERLERİ			NORMALİZE S DEĞERLERİ			AĞIRLIKLANMIŞ RS DEĞERLERİ			RS	NETİCE
	TKY	KEM	KKD	W _{TKY}	W _{KEM}	W _{KKD}	RS _{TKY}	RS _{KEM}	RS _{KKD}		
KAZA:1	0.19	0.31	0.15	8.07	6.92	8.48	38.8	24.7	25.7	89.2	ÖLÜM
KAZA:2	0.25	0.31	0.31	7.48	6.92	6.90	34.3	24.7	19.4	78.4	ÖLÜM
KAZA:3	0.25	0.10	0.16	7.48	9.02	8.45	34.3	34.9	25.6	94.8	ÖLÜM
KAZA:4	0.19	0.31	0.35	8.07	6.92	6.52	38.8	24.7	18.0	81.5	ÖLÜM
KAZA:5	0.25	0.21	0.20	7.48	7.90	8.04	34.3	29.3	23.9	87.5	ÖLÜM
KAZA:6	0.19	0.31	0.40	8.07	6.92	5.98	38.8	24.7	16.1	79.6	ÖLÜM
KAZA:7	0.19	0.10	0.19	8.07	9.02	8.13	38.8	34.9	24.2	97.9	ÖLÜM
KAZA:8	0.19	0.31	0.27	8.07	6.92	7.28	38.8	24.7	20.8	84.4	ÖLÜM
KAZA:9	0.25	0.31	0.28	7.48	6.92	7.24	34.3	24.7	20.7	79.7	ÖLÜM
KAZA:10	0.19	0.31	0.36	8.07	6.92	6.41	38.8	24.7	17.6	81.1	ÖLÜM
KAZA:11	0.35	0.48	0.43	6.52	5.19	5.68	27.5	17.3	15.0	59.9	AĞIR YARALANMA
KAZA:12	0.35	0.52	0.39	6.52	4.81	6.08	27.5	15.9	16.4	59.7	AĞIR YARALANMA
KAZA:13	0.35	0.69	0.33	6.52	3.08	6.69	27.5	9.6	18.6	55.7	AĞIR YARALANMA
KAZA:14	0.45	0.52	0.43	5.55	4.81	5.69	21.4	15.9	15.0	52.3	AĞIR YARALANMA
KAZA:15	0.35	0.52	0.69	6.52	4.81	3.14	27.5	15.9	7.4	50.7	AĞIR YARALANMA
KAZA:16	0.45	0.58	0.42	5.55	4.21	5.78	21.4	13.6	15.4	50.3	AĞIR YARALANMA
KAZA:17	0.35	0.31	0.72	6.52	6.92	2.75	27.5	24.7	6.4	58.6	AĞIR YARALANMA
KAZA:18	0.35	0.52	0.65	6.52	4.81	3.53	27.5	15.9	8.4	51.8	AĞIR YARALANMA
KAZA:19	0.65	0.69	0.80	3.48	3.08	2.00	10.8	9.6	4.6	25.0	HAFİF YARALANMA
KAZA:20	0.45	0.79	0.57	5.55	2.10	4.32	21.4	6.5	10.7	38.5	HAFİF YARALANMA
KAZA:21	0.65	0.69	0.38	3.48	3.08	6.18	10.8	9.6	16.7	37.1	HAFİF YARALANMA
KAZA:22	0.55	0.79	0.84	4.45	2.10	1.60	15.3	6.5	3.7	25.5	HAFİF YARALANMA
KAZA:23	0.65	0.58	0.50	3.48	4.21	5.01	10.8	13.6	12.8	37.2	HAFİF YARALANMA
KAZA:24	0.45	0.69	0.82	5.55	3.08	1.81	21.4	9.6	4.2	35.1	HAFİF YARALANMA
KAZA:25	0.45	1.00	0.88	5.55	0.00	1.16	21.4	0.7	2.8	24.8	SIYRIK
KAZA:26	1.00	0.58	1.00	0.00	4.21	0.00	0.7	13.6	0.7	14.9	SIYRIK
KAZA:27	1.00	0.90	0.81	0.00	0.98	1.87	0.7	3.2	4.3	8.2	SIYRIK
KAZA:28	0.90	0.90	0.93	0.97	0.98	0.72	2.5	3.2	2.0	7.7	SIYRIK
KAZA:29	0.90	0.90	0.88	0.97	0.98	1.16	2.5	3.2	2.8	8.5	SIYRIK
KAZA:30	1.00	1.00	0.86	0.00	0.00	1.37	0.7	0.7	3.2	4.6	SIYRIK

Şekil 6. Kalıp imalatlarında yapısal göçme kazası için öğrenme ağına ilişkin veriler

Figure 6. Data on the learning network for structural collapse accidents in shuttering works

Benzer şekilde tüm kaza türleri için 30 adet kaza verisi kullanılarak öğrenme ağı eğitilmiş ve tahmin denklemleri elde edilmiş ve Çizelge 8 'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Risk skoru üzerinden kaza şiddetlerinin sınıflandırmasını yapabilen tahmin denklemleri

Table 8. Estimation equations that can classify the severity of the accidents based on the risk score

Kaza Türü	Tahmin Denklemi
Kalıp imalatlarında yapısal göçme	$RS = (0,40 * ((1 - S_{TKY}) * 10)^2 + 1,51 * ((1 - S_{TKY}) * 10) + 0,68)$ $+ (0,15 * ((1 - S_{KEM}) * 10)^2 + 2,43 * ((1 - S_{KEM}) * 10) + 0,68)$ $+ (0,15 * ((1 - S_{KKD}) * 10)^2 + 1,66 * ((1 - S_{KKD}) * 10) + 0,68)$
Donatı imalat ve montaj işlerinde elektrik ile temas	$RS = (0,00 * ((1 - S_{TKY}) * 10)^2 + 2,83 * ((1 - S_{TKY}) * 10) + 1,64)$ $+ (0,00 * ((1 - S_{KEM}) * 10)^2 + 2,16 * ((1 - S_{KEM}) * 10) + 1,64)$ $+ (0,20 * ((1 - S_{KKD}) * 10)^2 + 5,15 * ((1 - S_{KKD}) * 10) + 1,64)$
İskele kurulum söküm işlerinde fırlatılan/düşen cisim çarpması	$RS = (0,29 * ((1 - S_{TKY}) * 10)^2 + 0,94 * ((1 - S_{TKY}) * 10) + 0,47)$ $+ (0,20 * ((1 - S_{KEM}) * 10)^2 + 1,20 * ((1 - S_{KEM}) * 10) + 0,47)$ $+ (0,60 * ((1 - S_{KKD}) * 10)^2 + 1,03 * ((1 - S_{KKD}) * 10) + 0,47)$
Cephe imalatlarında yüksekte düşme	$RS = (0,08 * ((1 - S_{TKY}) * 10)^2 + 3,53 * ((1 - S_{TKY}) * 10) + 1,46)$ $+ (0,00 * ((1 - S_{KEM}) * 10)^2 + 2,06 * ((1 - S_{KEM}) * 10) + 1,46)$ $+ (0,17 * ((1 - S_{KKD}) * 10)^2 + 3,23 * ((1 - S_{KKD}) * 10) + 1,46)$

UYGULAMANIN DOĞRULANMASI (VALIDATION OF PRACTICE)

Elde edilen denklemlerden cephe imalatlarında yüksekte düşme kazası denklemi, yeni bir projede çeşitli iş kazası senaryoları için kullanılmıştır. Denklemdaki S_{TKY} , S_{KKD} , S_{KEM} değerleri, olay anında kullanılacak ekipmanların Çizelge 7'deki ağırlıklarının toplamları olmak üzere RS değerleri aşağıdaki senaryolar için hesaplanmıştır (Çizelge 9). Örnek teşkil etmesi açısından 4 senaryonun risk analizi yapılmıştır.

Çizelge 9. Tahmin denklemlerinin senaryoların risk analizlerinde kullanılması

Table 9. Use of the estimation equations in risk analysis of the scenarios

	Senaryo	S_{TKY}	S_{KKD}	S_{KEM}	RS	Netice
1	Toplu koruma yöntemlerinden bazı önlemlerin alınmadığı (TKY-3,8) cephe imalatlarında çalışan bir işçinin sıcağın bunalarak (KEM-4) kişisel koruyucu donanımlarını çıkarması (KKD-2,3,4,6,7) ve isg uzmanının gözünden kaçması (KEM-1) ile işine korumasız olarak devam etmesi ve yüksekte düşmesi	0,476	0,425	0,333	62,9	Ağır Yaralanma (50-75)
2	Bütün toplu koruma önlemlerinin alındığı cephe imalatlarında çalışan bir işçinin bunalarak (KEM-4) kişisel koruyucu donanımlarını çıkarması (KKD-1,2,3,4,6) ve isg uzmanının gözünden kaçması (KEM-1) ile işine korumasız olarak devam etmesi ve yüksekte düşmesi	1,000	0,570	0,333	35,1	Hafif Yaralanma (0-25)
3	Hiçbir toplu koruma önleminin alınmadığı cephe imalatlarında, paraşüt tipi em. kemeri eksik (KKD-7) çalışan (KEM-4) bir işçinin isg uzmanının gözünden kaçması (KEM-1) ve sıcağın başının dönmesi sonucu dengesini kaybetmesi ile yüksekte düşmesi.	0,000	0,612	0,333	76,4	Ölüm (75-100)
4	Toplu koruma yöntemi olarak sadece yaşam halatı sistemi kurulu olan cephe imalatlarında kişisel koruyucu donanımları tam teşekküllü olarak ve isg uzmanı gözetiminde çalışan işçinin başının dönmesi sonucu aniden düşmesi	0,398	1,000	1,000	28,5	Hafif Yaralanma (25-50)

BULGULAR (RESULTS)

Geçmiş kaza verilerinden 120 adet veri 4 tip kazanın öğrenilmesi için kullanılmış ve elde edilen denklemler ile 20 veri test edilmiştir. Sonuçta 18 kaza neticesi doğru tahmin edilmiş olup 2 kaza neticesi için tahmin edilen sonuç, gerçekleşenden bir seviye daha az tehlikeli çıkmıştır. Ayrıca yeni başlanılacak bir inşaat projesinde, belirlenen kaza senaryolarının tahmini için tahmin denklemleri kullanılmıştır. Senaryo 1 ve 3 'de elde edilen sonuçlar şirket için kabul edilemez olduğundan önlemler artırılarak senaryo 2 ve 4 'ye dönüştürülmüş ve riskler başarılı bir şekilde yönetilmiştir.

Önerilen metot ile inşaat sektöründe iş sağlığı ve güvenliği konusunda kaza şiddetleri, alınan risk azaltıcı önlemlere bakılarak %90 oranında tahmin edilebilmiştir. Kaza şiddetinin sınıflandırılmasında sıyrık ve hafif yaralanma ile sonuçlanan kazalar kabul edilebilir, ağır yaralanma ve ölüm ile sonuçlanan kazalar kabul edilemez şeklinde ek bir gruplama yapılırsa bu çalışma ile bütün kaza neticeleri kabul edilebilirlik gruplamasına göre doğru olarak tahmin edilmiştir denilebilir. Metodun başarısının temeli,

klasik yöntemlere göre farklı olan ön bilgilendirme aşamasıdır. Bu aşama sayesinde YSA için gerekli veri sayısı ciddi oranda azalmıştır. Yapılan uygulama çalışması neticesinde kaza şiddetlerinin yüksek oranda alınacak önlemler ile ilişkisi olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Sonuçlar (Conclusions)

Seçilen 4 iş kazası türü için, YSA giriş katmanının AHP ile anlamlandırılmasında, 109 adet anket içerisinden tutarlılık seviyesi kabul edilebilir seviyede olan 25 anket kullanılmış olup YSA ağının diğer katmanlarının eğitilmesinde ve test edilmesinde toplamda 140 adet geçmiş kaza verisi kullanılmıştır. Geliştirilen model ile kazaların neticeleri %90 oranında doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Ayrıca yeni başlanılacak bir inşaat projesi için, eğitilen öğrenme ağından elde edilen tahmin denklemleri çeşitli iş kazası senaryolarında kullanılmış olup, ölüm ve ağır yaralanma ile sonuçlanan iş kazası senaryoları için önlemler daha sıkılaştırılarak kaza sonuçları hafif yaralanma seviyesine indirgenmiştir.

Bu çalışma ile inşaat sektöründe faaliyet gösteren bir kurum için iş sağlığı ve güvenliği alanında iş kazalarını önlemeye yönelik ek tedbirlerin ve kontrol mekanizmalarının daha verimli kullanılmasının sağlanması amacıyla, risk azaltıcı önlemlere bakılarak kaza sonuçlarının kabul edilebilir seviyelere çekilebilmesine imkân sağlayan bir metod önerilmiştir. İleriki çalışmalarda metodun aktivasyon fonksiyonlarının farklı tür denklemler ile test edilmesi ve ön bilgilendirme aşamasında farklı metodların kullanılabilirliği araştırılabilir.

Öneriler (Recommendations)

Kamu inşaatları için 4734 sayılı Kamu İhale Kanunu 10. Maddesi kapsamında tekliflerin yeterlilik değerlendirmesi ekonomik ve malî yeterlik ile mesleki ve teknik yeterlik kapsamında yapılmaktadır. Son yıllarda ihaleyi kazanabilmek için bazı katılımcılar çok düşük teklifler vermektedir. Bu yolla işi alan yükleniciler, projenin yürütülme safhasında maliyetleri azaltma düşüncesiyle İSG önlemlerini gerektiği gibi yerine getirmemektedir. Son yıllardaki iş kazaları ve ölümlerin artması, yüklenicilerin bu alanda üzerlerine düşeni yapmadıklarını ve yetersiz kaldıklarını göstermektedir. Buradan yola çıkılarak, ihaleye katılacak isteklilerden ihale için teklif fiyatıyla ilişkili olacak şekilde, İSG harcamaları için de teklif istenmeli ve yapı denetimi sürecinde bunun gerçekleştirilmesi sağlanmalıdır.

Ayrıca yeterlilik hususunda geçmiş iş bitirmelerde iş sağlığı güvenliği konusundaki performansı da asgari bir yeterlilik kriterine bağlanmalıdır. Bu noktada ihaleye katılacak istekliler, bu çalışma doğrultusunda teklif hazırlarken daha gerçekçi bir yaklaşım ile maliyet tahmini yapabileceklerdir.

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü doktora programında, Prof. Dr. Recep Kanıt denetiminde ve danışmanlığında yürütülen "Yapı Üretim Sürecindeki İş Kazaları Şiddetinin Ön Bilgilendirilmiş Yapay Öğrenme Metodu ile Tahmini" isimli tezden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Alizadeh, S. S., Mortazavi, S. B. ve Mehdi Sepehri, M. (2015). Assessment of accident severity in the construction industry using the bayesian theorem. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 21(4), 551-557.
- Aminbakhsh, S., Gunduz, M. ve Sonmez, R. (2013). Safety risk assessment using analytic hierarchy process (ahp) during planning and budgeting of construction projects. *Journal of Safety Research*, 46, 99-105.
- Chen, F., Wang, H., Xu, G., Ji, H., Ding, S. ve Wei, Y. (2020). Data-driven safety enhancing strategies for risk networks in construction engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, 197.
- Clarivate Analytics. (2020). Web of science [v.5.35] - web of science core collection. Erişim Tarihi: 14.06.2020, Adres: <https://www.webofknowledge.com/>

- Cox, S. ve Flin, R. (1998). Safety culture: Philosopher's stone or man of straw? *Work & Stress*, 12(3), 189-201.
- Gomathi, K. ve Shanmuga Priyaa, D. (2017). A fuzzy analytic hierarchy attribute weighting and deep learning for improving chd prediction of optimized semi parametric extended dynamic bayesian network. *2017*, 7(1.1), 8.
- Gurcanli, G. E., Bilir, S. ve Sevim, M. (2015). Activity based risk assessment and safety cost estimation for residential building construction projects. *Safety Science*, 80, 1-12.
- Gurcanli, G. E. ve Mungen, U. (2013). Analysis of construction accidents in turkey and responsible parties. *Industrial Health*, 51(6), 581-595.
- Hamid, A. R. A., Noor Azmi, M. R. A., Aminudin, E., Jaya, R. P., Zakaria, R., Zawawi, A. M. M., . . . Saar, C. C. (2019). Causes of fatal construction accidents in malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 220, 012044.
- Ilbahar, E., Karasan, A., Cebi, S. ve Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using pythagorean fuzzy ahp & fuzzy inference system. *Safety Science*, 103, 124-136.
- Karadal, H., Merdan, E. ve Abubakar, M. (2019). Güvenlik İklimi ve güvenlik kültürünün İşyeri yaralanmaları üzerine etkisinde güvenlik davranışlarının aracılık rolü: Döküm sanayinde bir araştırma. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(6), 329-339.
- Lasdon, L. S., Fox, R. L. ve Ratner, M. W. (1974). Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. *Revue française d'automatique, informatique, recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, 8(V3), 73-103.
- Li, W.-G., Yu, Q. ve Luo, R.-C. (2012). Application of fuzzy analytic hierarchy process and neural network in power transformer risk assessment. *Journal of Central South University*, 19(4), 982-987.
- Meng, W.-L., Shen, S. ve Zhou, A. (2018). Investigation on fatal accidents in chinese construction industry between 2004 and 2016. *Natural Hazards*, 94(2), 655-670.
- Mohammadfam, I., Soltanzadeh, A., Moghimbeigi, A. ve Savareh, B. A. (2015). Use of artificial neural networks (anns) for the analysis and modeling of factors that affect occupational injuries in large construction industries. *Electronic physician*, 7(7), 1515-1522.
- Öztemel, E. (2006). *Yapay sinir ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Pinto, A., Ribeiro, R. A. ve Nunes, I. L. (2012). Fuzzy approach for reducing subjectivity in estimating occupational accident severity. *Accid Anal Prev*, 45, 281-290.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process : Planning, priority setting, resource allocation*. New York; London: McGraw-Hill International Book Co.
- Shafique, M. ve Rafiq, M. (2019). An overview of construction occupational accidents in hong kong: A recent trend and future perspectives. *Applied Sciences*, 9(10).
- Sosyal Guvenlik Kurumu. (2018). Sgk İstatistik yıllıkları. Erişim Tarihi: 14.06.2020, Adres: http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari
- Winge, S. ve Albrechtsen, E. (2018). Accident types and barrier failures in the construction industry. *Safety Science*, 105, 158-166.
- Winge, S., Albrechtsen, E. ve Mostue, B. A. (2019). Causal factors and connections in construction accidents. *Safety Science*, 112, 130-141.
- Yilmaz, M. ve Kanit, R. (2018). A practical tool for estimating compulsory ohs costs of residential building construction projects in turkey. *Safety Science*, 101, 326-331.
- Zohar, D. (1980). Safety climate in industrial organizations: Theoretical and applied implications. *Journal of Applied Psychology*, 65(1), 96-102.



ALÜMİNYUM HİDROKSİT KRİSTALİZASYONU ÜZERİNE LİTYUM SAFSIZLIĞININ ETKİSİ

¹Ayhan Abdullah CEYHAN , ²Halil İbrahim TEMİZ 

^{1,2}Konya Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Konya, TÜRKİYE
¹aaceyhan@ktun.edu.tr , ²hibrahim.temiz0209@gmail.com

(Geliş/Received: 18.06.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 26.08.2020)

ÖZ: Bu çalışmada, farklı modül değerlerine (1,35; 1,41; 1,45; 1,49; 1,8; 2,0; 2,25; 2,50) sahip sodyum alüminat çözeltilerinin nükleasyon davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, çözeltiye verilen farklı aşırı doymunluk değeri (1,321-1,785) ve farklı derişimde (5-20 ppm) lityum (Li) varlığı için bekleme zamanı ölçümleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu, kritik serbest enerji değışımi, kritik nükleli yarıçapı, kritik nükleide yer alan molekül sayısı ve nükleasyon hızı hesaplanmıştır. Katkısız sodyum alüminat çözeltisi için bekleme zamanının, farklı aşırı doymunluk değerlerine bağlı olarak 100-400 dk. aralığında değıştiğı belirlenmiştir. Lityum varlığında ise, en yüksek bekleme zamanı 10 ppm lityum derişimi için 20 dk. olarak tespit edilmiştir. Klasik nükleasyon teorisine göre yapılan hesaplamalar sonucu, lityum varlığında, katkısız ortama kıyasla, kritik nükleli yarıçapının düştüğü, kritik nükleideki molekül sayısının azaldığı ve nükleasyon hızının arttığı belirlenmiştir. 5 ppm lityum katkısı için, katkısız ortama kıyasla, nükleasyon hızındaki artışın yaklaşık 100 kat, 20 ppm lityum katkısı için ise yaklaşık olarak 39 kat olduğu belirlenmiştir. Lityum varlığında, farklı modül değerlerindeki sodyum alüminat çözeltilerinin bekleme zamanlarının düşük ve yüksek modül değerine sahip çözeltiler için 6 – 7 dk. aralığında değıştiğı tespit edilmiştir. Modül 1,49 ve 1,8 için ise maksimum 10 dk'lık bekleme süreleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum hidroksit, lityum, nükleasyon, bekleme zamanı, kristalizasyon

Effect of Lithium Impurity upon Aluminum Hydroxide Crystallization

ABSTRACT: In this study, the nucleation behavior of sodium aluminate solutions having different modul values were investigated. For this aim, induction period measurements were carried out for different supersaturation ratio (1.321-1.785) and different lithium concentrations (5-20 ppm). As a result of experimental studies, critical free energy exchange, critical nuclei radius, critical nuclei number in molecule and nucleation rate were calculated. It was determined that the induction time for the pure sodium aluminate solution varied between 100-400 minutes for different supersaturation ratio. In the presence of lithium ranging from 5 to 20 ppm, the highest induction time was determined as 20 min. for 10 ppm lithium. Based on the classical nucleation theory, it was determined the critical nuclei radius decreased, the number of molecules in the critical nuclei decreased, and the nucleation rate increased, to compare to the pure solution in the existence of lithium. For the 5 ppm Li additive, it was determined that the increase in nucleation rate increased approximately 100 times and the increase of 20 ppm Li increased approximately 39 times compared to the pure solution. It has been found that the induction times of sodium aluminate solutions in different module B values vary in the range of 6-7 minutes for low and high modulus solutions in the presence of lithium. For modules 1.49 and 1.8, a maximum of 10 minutes of induction times were obtained.

Key Words Aluminum hydroxide, lithium, nucleation, induction time, crystallization

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum doğada en yaygın bulunan elementler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Günümüzde inşaat, makine, otomotiv, elektrik, metalürji ve savunma sanayi gibi pek çok sektörde farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Alüminyum üretiminde en önemli kaynak boksit cevheri olup 1821 yılında keşfedilmesinin ardından alüminyum üretiminin ham maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bayar Prosesi, temel olarak, boksit cevherinin Al_2O_3 içeriğinin sodyum hidroksit yardımıyla ayrıştırılarak sodyum alüminat çözeltisi eldesi ve ardından kristalizasyon işlemi ile alüminyum hidroksit üretimi basamaklarından oluşmaktadır.

Alüminyum hidroksit, doğada temel olarak gipsit, böhmite ve diaspor formlarında bulunmaktadır. Alüminyumun fiziksel ya da kimyasal bir su kaybı yaşamamış hali olarak da bilinir. Alüminyum hidroksit üretimi sırasında boksit cevherinde bulunabilecek bazı safsızlıklar, türüne ve derişimine bağı olarak, yüksek sıcaklık ve basınçta gerçekleştirilen reaksiyon aşamasında sodyum alüminat çözeltisine geçmektedirler. Kristalizasyon aşamasında ise, alüminyum hidroksit kristallerinin yapısına katılarak kristal saflığını düşürmektedirler.

Alüminyum hidroksit üretiminde, dekompozisyon prosesinin yavaş ve kompleks olması sebebiyle, aşırı doygun sodyum alüminat çözeltisinin ani bozunmasının incelenmesi oldukça önemlidir. Pek çok araştırmacı tarafından sodyum alüminat çözeltisinin kristalizasyon kinetiğinin incelendiği çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, üretim veriminin artırılması, aşınmaya ve parçalanmaya dayanıklı daha iri alüminyum hidroksit üretiminin gerçekleştirilmesi veya nano boyutlu alüminyum hidroksit üretiminin sağlanmasına yoğunlaştığı görülmektedir (Blanks (2000); Bhattacharya ve diğ. (2002); Li ve diğ. (2009a)). Ayrıca, kristalizör tipinin (Mejdell ve Kjolberg (1977); Yamada ve diğ. (1982)), nükleasyon olayının (Harris ve diğ. (1999); Li ve diğ. (2016); Liu ve diğ. (2015); Brown (1972)), kristalizasyon sıcaklığının (Skoufadis ve diğ. (2003)), karıştırıcı türünün (Kirchner ve diğ. (2015)), çözelti özelliklerinin (AddaiMensah (1997)), sodyum hidroksit derişiminin (Veesler ve Boistelle (1993); Li ve diğ. (2005b); Li (2005)), aşı kristali miktarının (Ruan ve diğ. (2016)), katkı maddesi (taç eter (Zeng ve diğ. (2007)), sodyum glukonat (Rossiter ve diğ. (1998)), formalin (Hayrapetyan ve diğ. (2006)), sodyum bikarbonat (Li ve diğ. (2009b))) ve alkol ilavesinin etkisinin (Zhang ve diğ. (2009); Wilhelmy (1990); Rasmussen ve diğ. (2001))) araştırıldığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Dünyadaki alüminyum üretimi yapan tesislerin kullandıkları cevherlerin yapısından farklı olarak, Türkiye’de çıkartılan cevher, yüksek lityum içeriğine sahiptir. Söz konusu lityum içeriğinin yaklaşık %65’i, reaksiyon aşamasında sodyum alüminat çözeltisine geçmektedir. Çözelti içerisinde kalan lityumun yaklaşık %90’ı ise $Li_2Al_4(CO_3)(OH)_{12} \cdot 3H_2O$ yapısında çökmek suretiyle alüminyum hidroksit kristalleri ile birlikte sistemden ayrılmaktadır.

Sodyum alüminat çözeltisi içerisinde bulunan lityum safsızlığının oluşturduğu en önemli problem, kristalizöre alınan çözeltinin kristalizasyon davranışını olumsuz etkilemesidir. Oldukça kararlı bir yapıya sahip olan sodyum alüminat çözeltisi içerisinde lityumun varlığı, başta nükleasyon olmak üzere, kristal habitini de etkilemektedir. Çözelti kararlılığının azalması, nükleasyon hızını artırmakta ve kristalizasyon işleminin kontrolünü zorlaştırmaktadır. Literatürde lityum safsızlığının alüminyum hidroksit kristalizasyonu üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışma yer almamaktadır.

Bu çalışmada, sodyum alüminat çözeltisi içerisinde yer alan 0-20 ppm aralığındaki lityum varlığının çözeltinin kristalizasyon davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı modül değerlerine (1,35; 1,45; 1,49; 2,0; 2,25; 2,50) sahip olacak şekilde sentetik sodyum alüminat çözeltileri hazırlanmış ve farklı aşırı doygunluk değerleri (1,321-1,785) için bekleme zamanları ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, önemli kristalizasyon parametreleri olan, kritik serbest enerji değışimi, kritik nükleli yarıçapı, kritik nükleide yer alan molekül sayısı ve nükleasyon hızı hesaplanmıştır.

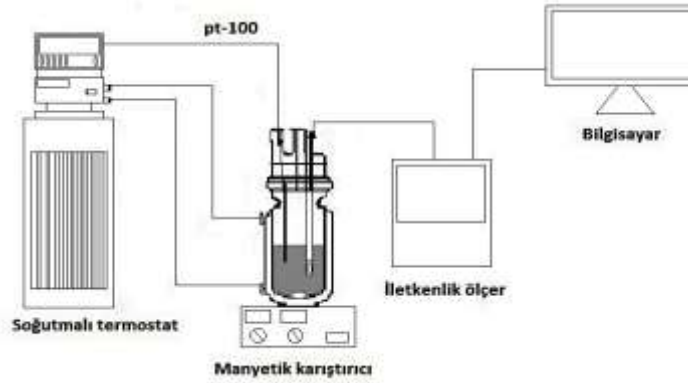
MATERYAL ve YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

Sodyum alüminat çözeltisinden alüminyum hidroksit kristalizasyonu üzerine lityum varlığı etkisinin incelendiği bu çalışmada kullanılan alüminyum hidroksit, sodyum hidroksit ve lityum hidroksit Merck firmasından satın alınmıştır.

DeneySEL çalışmaların başlangıcında çalışılacak modül değerleri belirlenmiştir. Modül değerleri belirlenirken kristalizasyon aşamasının başlangıcından, siklonda ayrılma işlemi öncesine kadar olan aralıktaki olası değerler dikkate alınmıştır. Bu sebeple, modül değerleri, 1,35, 1,45, 1,49, 2,0, 2,25, 2,50 olarak seçilmiştir. Modül değeri Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Modül} - B = \frac{Na_2O (NaOH+Na_2CO_3 \text{ içerisindeki toplam})}{Al_2O_3} \quad (1)$$

Endüstriyel üretimde, kristalizasyon işlemine giren çözeltinin lityum içeriği yaklaşık olarak 20 ppm seviyesindedir. Bu sebeple, çalışılacak lityum derişimi 0-20 ppm aralığında olacak şekilde alınmıştır. Çalışma sıcaklığı olarak, 95 – 80°C sıcaklık aralığı dikkate alınmıştır. Hesaplamalarda bu sıcaklık aralığına karşılık gelen aşırı doygunluk değerleri kullanılmıştır. Bekleme zamanı ölçümü için kullanılan deneySEL sistem Şekil 1’de verildiği gibidir.



Şekil 1. Bekleme Zamanı Ölçüm Sistemi

Figure 1. Induction Period Measurement System

Sistem, dış sıcaklık kontrolü yapabilen soğutmalı termostat (Lauda Proline RP 855), ceketli reaksiyon kabı, çözelti derişimindeki değışimi takip edebilmek için kullanılan pH-iletkenlik ölçer cihazı (Mettler-Toledo Seven Excellence S400), iletkenlik değerlerinin anlık olarak kaydedilmesinde kullanılan bilgisayar-yazılım sistemi ve reaksiyon kabı içerisindeki çözeltinin karıştırılmasında kullanılan manyetik karıştırıcıdan (IKA RCT Basic Ikamag) oluşmaktadır.

Belirli bir modül değerine sahip çözelti, reaksiyon kabına alınarak çalışılacak sıcaklık değerine hızla getirilmiştir. Ardından gözle ve iletkenlik değışimi yardımıyla nüklei oluşumu takip edilmiştir. Çözelti içerisinde iletkenlik değerinde ani değışimin ortaya çıktığı sıcaklık ve geçen süre kaydedilerek gerekli hesaplamalar aşağıda açıklandığı şekilde yapılmıştır.

Klasik nükleasyon teorisine göre (Ceyhan ve diğ. 2014), aşırı doygun bir çözeltide küresel bir nükleinin oluşumu için gerekli olan serbest enerji değışimi Eşitlik 2’de verildiği şekildedir.

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_s = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (2)$$

Eşitlik 2’de, ΔG_v (J veya J/cm³) ve ΔG_s (J veya J/cm²) sırasıyla, birim hacim ve birim alan oluşumu için gerekli serbest enerji değışimi; r kritik nüklei yarıçapı (cm veya m) ve γ ise nüklei-çözelti sistemi için arayüzey gerilimidir. Eşitlik 2’nin sağ tarafında yer alan iki terim farklı işaretlerde olup, her ikisi de r ye bağlı olarak değışim göstermektedir. Bu sebeple nüklei oluşumu için gerekli serbest enerji değışimi; Eşitlik 3’de verilen durum için bir maksimumdan geçmektedir.

$$\frac{d(\Delta G)}{dr} = 8 \cdot \pi \cdot r^* \cdot \gamma + 4 \cdot \pi \cdot (r^*)^2 \cdot \Delta G_v = 0 \quad (3)$$

Dolayısıyla kritik nüklei yarıçapı r^* Eşitlik 4’de verildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$r^* = - \frac{2\gamma}{\Delta G_v} \quad (4)$$

Denklemdaki, ΔG_v , Eşitlik 5’de verildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$\Delta G_v = - \frac{kT \ln(S)}{\vartheta} \quad (5)$$

S terimi, aşırı doymunluk oranı olup, $S=C/C^*$ (birimsiz) ile ifade edilir. C (g/g.d.çözelti veya kg/kg.d.çözelti) mevcut doymunluk değeri, C^* (g/g.d.çözelti veya kg/kg.d.çözelti) denge doymunluk değeri, k Boltzmann sabiti (J/K) ve ϑ ise kristal molar hacmini (g/m^3 veya kg/m^3) temsil etmektedir.

Kritik serbest enerji değişimi, ΔG^* , Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'de verildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$\Delta G^* = \frac{16\pi}{3} \cdot (r^*)^2 \cdot \gamma \quad (6)$$

$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v)^2} = \frac{16\pi\gamma^3 \cdot \vartheta^2}{(3 \cdot k \cdot T \cdot \ln S)^2} \quad (7)$$

Kritik nükleide yer alan molekül sayısı, i^* (sayı), Eşitlik 8'de verildiği şekildedir.

$$i^* = \frac{4\pi(r^*)^3}{3\vartheta} \quad (8)$$

Birim zamanda, birim hacimde oluşan nüklei sayısı olarak tanımlanan nükleasyon hızı J (nüklei/s/cm³) ile çözelti içerisinde görülebilen ilk nükleinin oluşumu için gerekli süre bekleme zamanı τ , (dk.) arasındaki ilişki Eşitlik 9'da verildiği gibidir.

$$J = \frac{1}{\tau} = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{kT}\right) = A \cdot \exp\left(-\frac{16\pi\gamma^3}{kT\Delta G_v^2}\right) = A \cdot \exp\left(-\frac{16\pi\gamma^3 \cdot \vartheta^2}{3 \cdot k^3 \cdot T^3 \cdot (\ln S)^2}\right) \quad (9)$$

Kristal-çözelti arayüzey gerilimi γ (mJ/cm² veya mJ/m²), Eşitlik 9'un lineerleştirilmesi sonucu hesaplanabilmektedir (Eşitlik 10).

$$\ln(\tau) = -\ln(A) + \frac{16\pi\gamma^3 \cdot \vartheta^2}{3k^3 T^3 (\ln S)^2} = K + \frac{m}{(\ln S)^2} \quad (10)$$

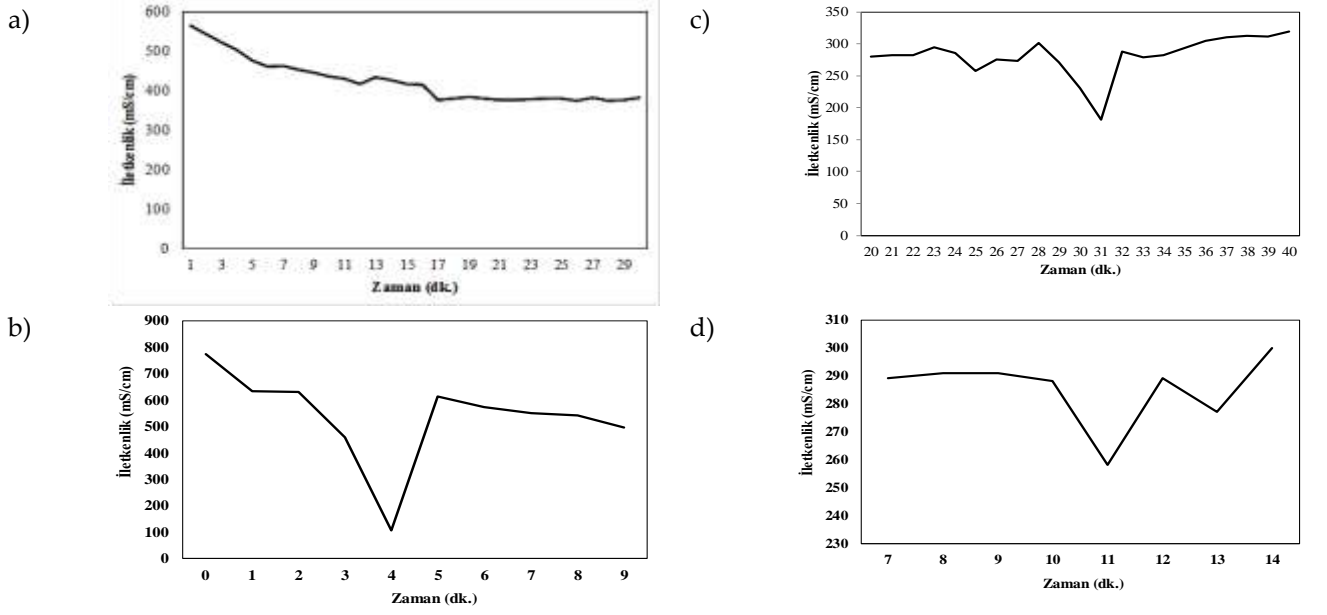
$1/(\ln S)^2$ ile $\ln(\tau)$ grafiğinin eğim ve kayım değerleri yardımıyla sırasıyla γ ve A değerleri elde edilmektedir.

BULGULAR ve SONUÇLARIN İRDELENMESİ (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çalışmanın ilk aşamasında, otoklavda gerçekleşen reaksiyon sonrası ele geçen sodyum alüminat çözeltisinin modül değeri dikkate alınarak bekleme zamanı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, modül değeri 1,49 olacak şekilde sodyum alüminat çözeltileri hazırlanarak katkısız ve katkılı (5 ppm, 10 ppm, 20 ppm Li) ortamlar için ölçümler yapılmıştır.

Çözelti ortamında lityum katkısının olmadığı durumda, çözeltinin iletkenlik değeri, azalan sıcaklık ile birlikte azalmaktadır. Ancak, sodyum alüminat çözeltisi yüksek kararlılıkta olmasından dolayı, yüksek aşırı doymunluk değerlerini uzun süre taşıyabilmekte ve iletkenlik değerlerinde ani azalmalar görülmemektedir (Şekil 2a). Bu sonuç Li ve diğ. (2005a) tarafından bulunan sonuç ile tamamen uyumludur.

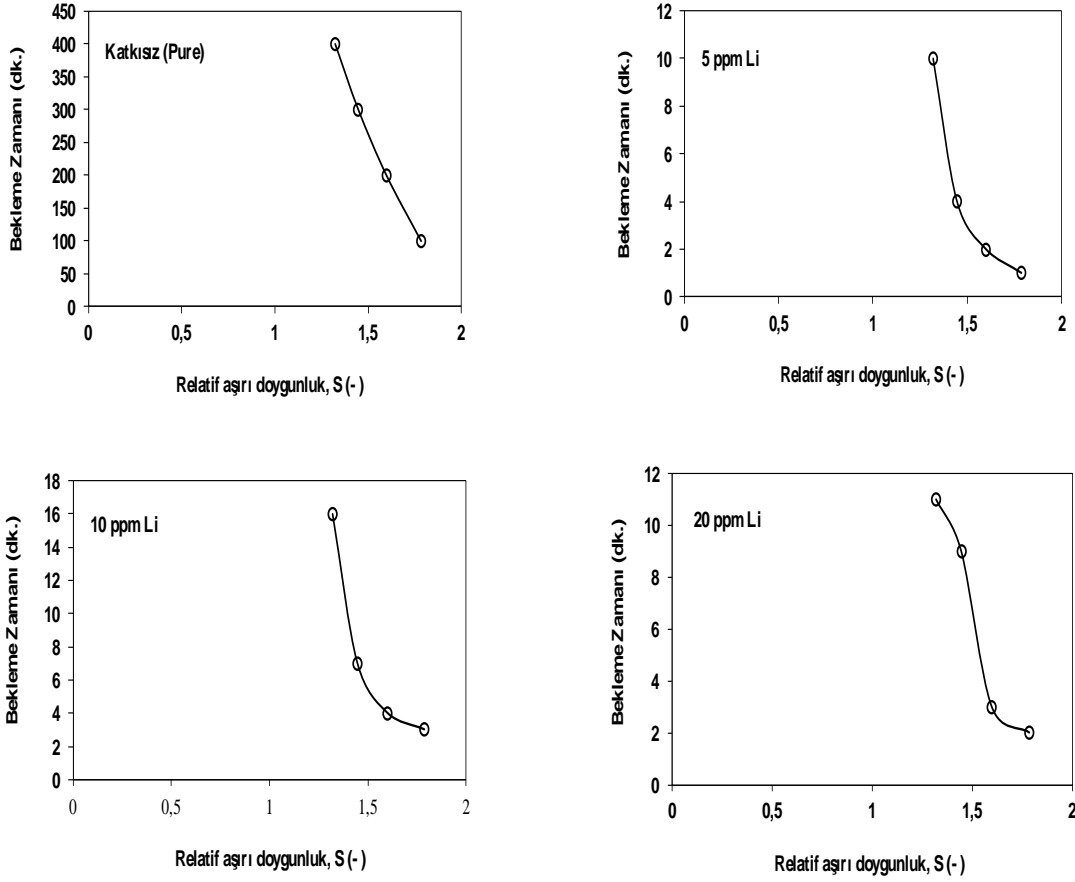
Farklı derişimlerde lityum varlığında ise, azalan sıcaklık ile birlikte, iletkenlik değerlerinde ani azalmalar ortaya çıkmaktadır (Şekil 2b-d). Sonrasında, çözelti kararlılığı yüksek olduğu için çözeltinin iletkenlik değeri tekrar yükselmektedir. Bu durum muhtemelen, lityum ve alüminyum hidroksit reaksiyonu sonucunda kompleks oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu noktadan itibaren çözelti içerisinde nükleasyon gözlenmektedir. Bu sebeple ani iletkenlik düşmesinin gerçekleştiği süre, bekleme zamanı olarak kaydedilmiştir.



Şekil 2. Sodyum Alüminat Çözeltisinin İletkenliğinin Zamanla Değişimi a) Saf b) 5 ppm Li katkılı c) 10 ppm Li katkılı d) 20 ppm Li katkılı

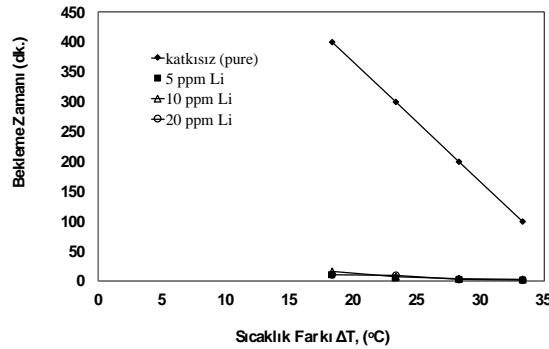
Figure 2. Conductivity Change of Sodium Aluminate Solution with Time a)Pure, b) 5 ppm Li-added c) 10 ppm Li-added d) 20 ppm Li-added)

Literatürde, Liu ve diğ. (2015) tarafından kristalizasyon ortamına aşu kristali ilavesinin etkisinin incelendiği çalışmada, aşu kristali varlığının çözeltinin iletkenlik değerini aniden düşürdüğü ve çözelti kararlılığının yüksek olmasından kaynaklı olarak iletkenlik değerinin tekrar yükseldiği ifade edilmiştir. Bu sonuç tarafımızdan lityum katkısı varlığında elde edilen elektriksel iletkenlik değişimi ile benzer yapıdadır. Katkısız ve farklı derişimlerde lityum varlığı için, bekleme zamanlarının bağıl aşu doygunluk ile değişimleri Şekil 3’de verildiği gibidir. Katkısız ve katkılı ortam için bekleme zamanlarının sıcaklık farkı ile değişimlerinin bir arada gösterimi ise Şekil 4’deki gibidir.



Şekil 3. Katkısız ve Lityum Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltilerinin Bekleme Zamanlarının Aşırı Doyguluk İle Değişimleri

Figure 3. Change of Induction Period of Sodium Aluminate Solution with Supersaturation

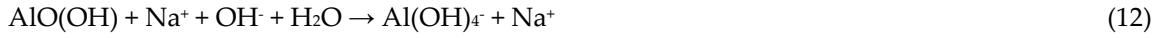


Şekil 4. Katkısız ve Lityum Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltilerinin Bekleme Zamanlarının Sıcaklık Farkı İle Değişimleri

Figure 4. Change of Induction Periods of Pure and Li-Added Sodium Aluminate Solutions

Dünyanın farklı bölgelerinde çıkarılan boksit cevherlerinin lityum içerikleri ortalama %0,001 civarında iken, Türkiye’de çıkartılan cevher, %0,025-0,060 aralığında lityum içermektedir. Cevher içerisindeki lityum, reaksiyon basamağında sodyum hidroksit ile reaksiyona girmektedir ve kristalizasyon aşaması öncesinde sodyum alüminat çözeltisi içerisinde ortalama 20 ppm değerindedir. Ayrıca, alüminyum hidroksitin sodyum hidroksit ile reaksiyonuna (Eşitlik 11 ve Eşitlik 12) benzer şekilde, sodyum hidroksit ile reaksiyona girerek (Eşitlik 13), çift katmanlı hidroksit olan $[LiAl_2(OH)_6]_x \cdot nH_2O$

bileşiğinin oluşumuna da sebep olmaktadır (O'hare ve diğ., 2002; Baygül, 2017). Bu durum oldukça kararlı yapıdaki sodyum alüminat çözeltisinin kararlılığının değişimine yol açmaktadır.



Şekil 3 ve Şekil 4'den görüldüğü gibi, katkısız ortamda çözelti kararlılığının da bir sonucu olarak bekleme zamanları yüksek değerlerdedir. Bununla birlikte, lityum katkısı varlığında katkısız ortama kıyasla oldukça düşük değerlerde bekleme zamanları söz konusudur. Farklı katkı miktarı için kendi aralarında görece fark söz konusu olmasına rağmen, çözelti içerisinde nükleasyon oldukça erken sürede başlamaktadır. Şekil 3'den, katkısız ortamda, düşük relatif aşırı doyumluk değerleri (1,321) için 400 dk'ya kadar çıkan bekleme zamanlarının, aynı relatif aşırı doyumluk değerleri için lityum varlığında 20 dk'nın altına düştüğü görülmektedir. Artan relatif aşırı doyumluk değerleri ile birlikte bu süre 1-2 dk'ya kadar inmektedir. Bu sonuç, sodyum alüminat çözeltisinin kristalizöre verilmeden önce bekleme tankında nükleasyon eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu durum, çözeltiye uygulanan aşırı soğutma miktarının ölçüsü olan sıcaklık farkı ile bekleme zamanlarının değişiminden de açıkça görülmektedir (Şekil 4).

Bu sonuç, çözelti içerisindeki lityumun sodyum hidroksit ile reaksiyona girmesi ve Eşitlik 13'de verilen çift katmanlı hidroksit yapısındaki $[\text{LiAl}_2(\text{OH})_6]\text{X.nH}_2\text{O}$ bileşiğinin oluşmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan bu bileşiğin çözünürlük değerinin alüminyum hidroksitin çözünürlük değerinden daha düşük olması sebebiyle, nükleasyon olayı beklenenden erken başlamaktadır.

Nükleasyon olayı birincil nükleasyon ve ikincil nükleasyon olmak üzere iki başlık altında incelenmektedir. Birincil nükleasyon, doğrudan aşırı doyumluk ile ilişkili olup, homojen ve heterojen nükleasyon olarak ikiye ayrılmaktadır. Etkin olan basamak aşırı doyumluk tarafından kontrol edilmektedir. Aşırı doyumluğun oluşturulduğu an ile kritik boyuta erişen nükleinin tespit edildiği süre arasındaki fark, bekleme zamanı olarak tanımlanmaktadır. Dolayısıyla, deneysel olarak ölçülen bekleme zamanı, kritik nükleinin oluşum zamanı ve tespit edilebilecek büyüklüğe erişebileceği zamanın toplamından oluşmaktadır.

Eşitlik 10, bekleme zamanının aşırı doyumluk ile değişimini vermektedir. $\ln(\tau)$ ile $1/(\ln S)^2$ arasında çizilecek grafikten elde edilen doğru, farklı eğimlere sahip iki lineer kısımdan oluşmaktadır. Doğrulardan bir tanesi, yüksek aşırı doyumluk değerleri için homojen nükleasyonu temsil ederken, diğeri düşük aşırı doyumluklar için heterojen nükleasyonu temsil etmektedir. Homojen nükleasyon esas olarak aşırı doyumluğun fonksiyonu iken, heterojen nükleasyon ise, çözelti içerisinde bulunması muhtemel toz partiküllerinin veya kristalizör yüzeyi gibi etkilerin fonksiyonudur. Bu dış faktörler, heterojen nükleasyonda gerekli olan enerji bariyerinin homojen nükleasyon için gerekli enerji bariyerinden daha düşük olmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, yüksek aşırı doyumluk değerleri için homojen nükleasyon hızı yüksek, düşük aşırı doyumluk değerleri için ise nükleasyon hızı düşüktür. Buna karşılık, düşük aşırı doyumluk değerleri için heterojen nükleasyon hızı yüksektir.

$\ln(\tau)$ ile $1/(\ln S)^2$ arasında çizilecek grafikten elde edilen doğrunun eğiminden arayüzey gerilimi değeri hesaplanmaktadır. Arayüzey gerilimi, çözelti içerisinde kristalizasyonun olabirliğine işaret eden önemli bir termodinamik büyüklüktür. $\ln(\tau)$ ile $1/(\ln S)^2$ arasında çizilecek grafik yardımıyla hesaplanan nükleasyon parametreleri, katkısız sodyum alüminat çözeltisi için Çizelge 1'de, 5 ppm lityum katkısı için Çizelge 2'de, 10 ppm lityum katkısı için Çizelge 3'de ve 20 ppm lityum katkısı için ise Çizelge 4'de verildiği gibidir. Ayrıca, katkısız ve farklı derişimlerde lityum katkılı sodyum alüminat çözeltileri için homojen ve heterojen nükleasyon durumlarında arayüzey gerilimlerinin değişimi Çizelge 5'de verildiği gibidir.

Çizelge 1. Katkısız Sodyum Alüminat Çözeltisi İçin Nükleasyon Parametrelerinin Değişimi*Table 1. Change of Nucleation Parameters for Pure Sodium Aluminate Solution*

S	dGv, J/cm ³	dGv*, J.10 ²¹	r*, (m).10 ¹⁰	i*(sayı)	J(nüklei/s/cm ³).10 ⁸
1,785	-57,791	3,242	2,992	2,095	16668,624
1,598	-46,740	4,956	3,700	3,961	8334,870
1,446	-36,793	0,938	2,301	0,952	5557,029
1,321	-27,748	1,649	3,050	2,219	4168,687

Çizelge 2. 5 ppm Li Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltisi İçin Nükleasyon Parametrelerinin Değişimi*Table 2. Change of Nucleation Parameters for Sodium Aluminate Solution 5 ppm Li-added*

S	dGv, J/cm ³	dGv*, J.10 ²¹	r*, (m).10 ¹⁰	i*(sayı)	J(nüklei/s/cm ³).10 ⁸
1,785	-57,791	3,242	2,992	2,095	1666912,139
1,598	-46,740	4,956	3,700	3,961	833511,834
1,446	-36,793	2,989	3,386	3,035	416573,643
1,321	-27,748	5,256	4,489	7,075	166606,893

Çizelge 3. 10 ppm Li Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltisi İçin Nükleasyon Parametrelerinin Değişimi*Table 3. Change of Nucleation Parameters for Sodium Aluminate Solution 10 ppm Li-added*

S	dGv, J/cm ³	dGv*, J.10 ²¹	r*, (m).10 ¹⁰	i*(sayı)	J(nüklei/s/cm ³).10 ⁸
1,785	-57,791	1,346	2,232	0,870	665055,405
1,598	-46,740	2,057	2,760	1,644	498772,416
1,446	-36,793	2,697	3,272	2,738	238070,690
1,321	-27,748	4,741	4,338	6,383	104150,218

Çizelge 4. 20 ppm Li Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltisi İçin Nükleasyon Parametrelerinin Değişimi*Table 4. Change of Nucleation Parameters for Sodium Aluminate Solution 20 ppm Li-added*

S	dGv, J/cm ³	dGv*, J.10 ²¹	r*, (m).10 ¹⁰	i*(sayı)	J(nüklei/s/cm ³).10 ⁸
1,785	-57,791	1,897	2,503	1,226	833209,780
1,598	-46,740	2,900	3,095	2,317	555444,187
1,446	-36,793	0,654	2,040	0,664	185210,667
1,321	-27,748	1,150	2,705	1,548	151553,493

Çizelge 5. Katkısız ve Li Katkılı Sodyum Alüminat Çözeltilerinin Arayüzey Gerilimlerinin Değişimi*Table 5. Change of Surface Tensions for pure and Li-added Sodium Aluminate Solution*

	Yüzey gerilimi homojen, mJ/m ²	Yüzey gerilimi heterojen, mJ/m ²
Katkısız	8,6468	4,2321
5 ppm Li	8,6468	6,2286
10 ppm Li	6,4504	6,0184
20 pm Li	7,2321	3,7535

Çizelge 1 – Çizelge 4'den görüldüğü gibi, katkısız ve lityum katkılı sodyum alüminat çözeltilerinin nükleasyon hızları, artan aşırı doyumluk değeri ile birlikte artmaktadır. Ayrıca gerek katkısız ve gerek lityum katkılı sodyum alüminat çözeltileri için, beklenildiği şekilde, homojen nükleasyon için gerekli serbest enerji değişimi, heterojen nükleasyon için gerekli enerji serbest enerji değişiminden daha yüksektir.

Katkısız ortamdaki kritik nükle yarıçapı (r*), homojen ve heterojen nükleasyon için, artan aşırı doyumluk değeri ile birlikte azalmaktadır. Ayrıca, artan lityum derişimi ile birlikte de azalma söz konusudur. Homojen nükleasyonda, 5 ppm lityum katkısı için 2,99.10⁻¹⁰ m değerinden, 20 ppm lityum

katkısı için $2,507 \cdot 10^{-10}$ m değerine düşmektedir. Heterojen nükleasyonda, 5 ppm lityum katkısı için $3,05 \cdot 10^{-10}$ m değerinden, 20 ppm lityum katkısı için $2,705 \cdot 10^{-10}$ m değerine kadar azalmaktadır.

Kritik nükleli yarıçapının düşmesi ve kritik nükleide yer alan molekül sayısının azalması, nükleasyon hızının arttığına işaret etmektedir. Elde edilen sonuçlar bu durumu desteklemektedir. Katkısız ortam için nükleasyon hızı oldukça düşük değerlerdedir (homojen nükleasyon için; $16668,624 \cdot 10^8$ (nüklei/s/cm³), heterojen nükleasyon için $4168,687 \cdot 10^8$ (nüklei/s/cm³). Katkısız ortama kıyasla, 5 ppm lityum katkısı için yaklaşık 100 kat, 20 ppm lityum katkısı için ise yaklaşık 39 kat artış söz konusudur.

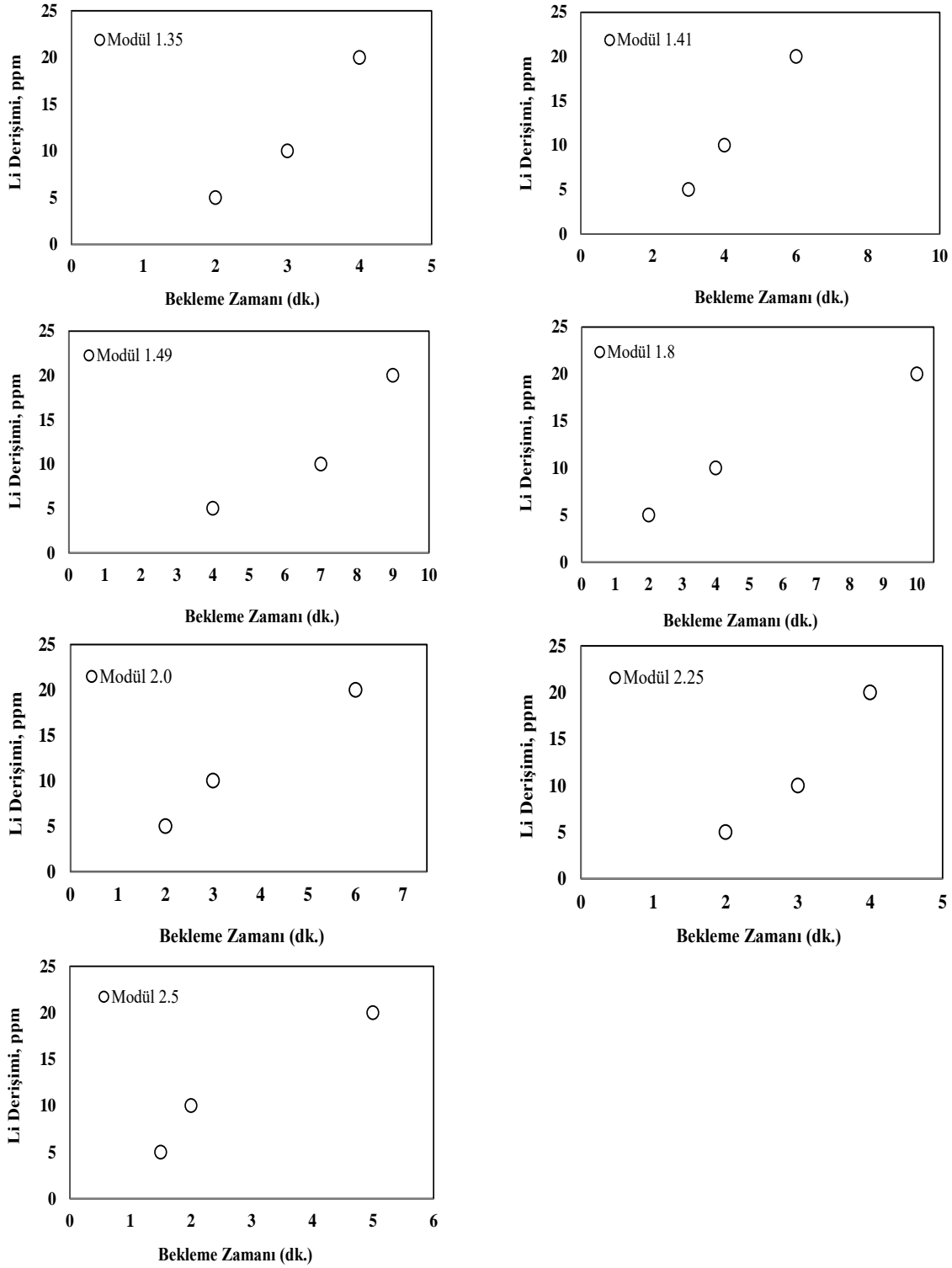
Çizelge 5'de verilen arayüzey gerilimi değişimlerinden görüldüğü gibi, katkısız ve lityum katkılı durumda kristal-çözelti arayüzey gerilimi değerleri, heterojen nükleasyon için homojen nükleasyona kıyasla daha düşük değerlerdedir. Bu durum, homojen nükleasyonun yüksek aşırı doyumluğa bağlılığı ve heterojen nükleasyonun toz veya kristalizör yüzeyi gibi dış parametrelere bağlılığı göz önüne alındığında beklenen bir durumdur.

Çizelge 5'den, katkısız duruma kıyasla, artan lityum katkısı için arayüzey geriliminde görece bir azalma olduğu da görülmektedir. Arayüzey gerilimindeki azalma, çözelti içerisinde kristal yüzeyine gerçekleşen difüzyonun direncinin azalmasına ve dolayısıyla ve nükleasyonun hızlanmasına sebep olmaktadır.

Çalışmanın son kısmında, farklı modül değerlerine sahip sodyum alüminat çözeltilerinin bekleme zamanları üzerine lityum katkısının etkisi sabit bir relatif aşırı doyumluk değeri için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'de verildiği gibidir.

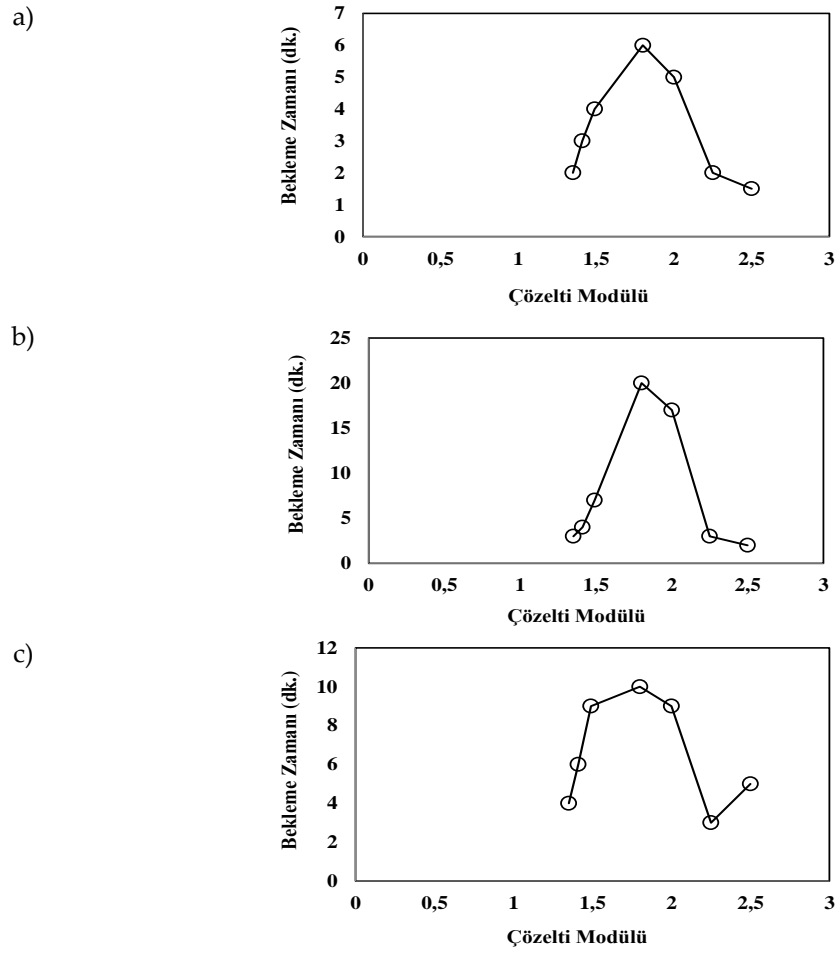
Şekil 5'den görüldüğü gibi, farklı derişimlerde lityum katkısı varlığında, 1,35 ile 2,50 aralığında değişen modül değerlerine sahip sodyum alüminat çözeltilerinin bekleme zamanları 10 dk'nın altına düşmektedir. Ayrıca, modül değerlerine bağlı olarak bekleme zamanlarında kendi içerisinde görece değişimler de söz konusudur. Bu durumun muhtemel sebebi, sodyum alüminat çözeltisindeki alüminyum hidroksit derişimindeki değişimin, çözelti içerisinde oluşan lityum-alüminyum kompleksi ($\text{LiAl}_2(\text{OH})_6]X \cdot n\text{H}_2\text{O}$) derişimi üzerine etkili olmasıdır.

Çözelti modülü ile bekleme zamanının lityum derişimine bağlı değişimleri Şekil 6'da verildiği gibidir. Şekil 6'dan görüldüğü gibi, modül değerinin artışı ile birlikte bekleme zamanları önce yükselmekte, ardından ise azalmaya başlamaktadır. En yüksek bekleme zamanları, çözelti içerisindeki lityum derişiminden bağımsız olarak, çözelti modülünün 1,8 olduğu durumda elde edilmiştir. Düşük ve yüksek modül değerleri için ise, bekleme zamanları daha düşük değerler almaktadır. Bu duruma çözelti içerisinde alüminyum hidroksit derişimine bağlı olarak oluşan kompleks yapının ve çözelti kararlılığının yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 5. Farklı Modul_b değerlerine sahip sodyum alüminat çözeltilerinin bekleme zamanları üzerine Li katkısının etkisi

Figure 5. Effect of Li additive Upon Induction Period of Sodium Aluminate Solutions Having Different Modul_b



Şekil 6. Bekleme zamanı ile çözelti modülü arasındaki değişim a) 5ppm Li b) 10 ppm Li c) 20 ppm Li
Figure 6. Change of Induction Period with Solution Modulus Value at 5 ppm Li b) 10 ppm Li c) 20 ppm Li

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sodyum alüminat çözeltisinden alüminyum hidroksit kristalizasyonu üzerine lityum varlığının etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Çözelti içerisinde lityum varlığı söz konusu değilken iletkenlik değeri azalan sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Lityum varlığında ise, lityum ile alüminyum hidroksit reaksiyonu sonucu oluşan $[\text{LiAl}_2(\text{OH})_6] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ bileşiğinden kaynaklandığı düşünülen çözelti kararlılığındaki azalmanın bir sonucu olarak iletkenlik değeri önce düşmekte, ardından tekrar yükselmektedir.

- İletkenlik değişiminden yararlanılarak belirlenen bekleme zamanları katkısız sodyum alüminat çözeltisi için verilen aşırı soğuma miktarına bağlı olarak 100 – 400 dk. aralığında değişmektedir. 5 – 20 ppm arasında değişen lityum varlığında ise, en yüksek bekleme zamanı 10 ppm lityum için 20 dk. olarak tespit edilmiştir. Klasik nükleasyon teorisine göre yapılan hesaplamalar sonucu, lityum varlığında, katkısız ortama kıyasla kritik nükle yarıçapının düştüğü, kritik nükleideki molekül sayısının azaldığı ve nükleasyon hızının arttığı belirlenmiştir. Katkısız ortamda nükleasyon hızları homojen nükleasyon için $16668,62 \cdot 10^{-8}$ (nüklei/s/cm³), heterojen nükleasyon için $4168,69 \cdot 10^{-8}$ (nüklei/s/cm³) olarak bulunmuştur. 5 ppm lityum varlığında ise homojen nükleasyon için $1666912,14 \cdot 10^{-8}$ (nüklei/s/cm³), heterojen nükleasyon için $166606,89 \cdot 10^{-8}$ (nüklei/s/cm³) olarak bulunmuştur. 5 ppm için, katkısız ortama kıyasla, nükleasyon hızındaki artış yaklaşık 100 kat iken, 20 ppm için yaklaşık olarak 39 kat artış söz konusudur.

- Katkısız ve lityum katkılı durumda kristal çözelti arayüzey gerilim değerleri heterojen nükleasyon için homojen nükleasyona kıyasla daha düşük değerde bulunmuştur. Homojen nükleasyon için arayüzey

gerilimi katkısız ortamda 8,6468 mJ/m², 20 ppm lityum varlığında ise 7,2321 mJ/m² olarak hesaplanmıştır. Heterojen nükleasyon için arayüzey gerilimi katkısız ortamda 4,2321 mJ/m², 20 ppm lityum varlığında ise 3,7535 mJ/m² olarak hesaplanmıştır.

- Farklı modül değerlerindeki sodyum alüminat çözeltilerinin bekleme zamanları lityum varlığında düşük ve yüksek modüle sahip çözeltiler için 6 – 7 dk. aralığında bulunmuştur. Modül 1,49 ve 1,8 için ise maksimum 10 dk'lık bekleme süreleri elde edilmiştir.

KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. Proje No: 17201070.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

- C : Mevcut doyumluk değeri
 C^* : Denge doyumluk değeri
 ΔG_v : Birim hacim oluşumu için gerekli serbest enerji değişimi
 ΔG_s : Birim alan oluşumu için gerekli serbest enerji değişimi
 ΔG^* : Kritik serbest enerji değişimi
 ΔT : Sıcaklık farkı
 i^* : Kritik nükleide yer alan molekül sayısı
 J : Nükleasyon hızı
 k : Boltzmann sabiti
ppm: parts per million (milyonda bir kısım)
 r^* : Kritik nüklei çapı
 S : Aşırı doyumluk oranı
 τ : Bekleme zamanı
 γ : Nüklei-çözelti sistemi için arayüzey gerilimi
 ϑ : Kristal molar hacmi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- AddaiMensah, J., 1997, "Surface and structural characteristics of gibbsite precipitated from pure, synthetic Bayer liquor", *Miner. Eng.*, Vol. 10, No. 1, pp. 81-96.
- Baygül, M., 2017, *Eti Alüminyum Fabrikası Alüminyum Hidroksit Üretim Prosesinden Lityumun Ayrılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bhattacharya, I. N., Pradhan, J. K., Gochhayat, P. K. ve Das, S. C., 2002, "Factors controlling precipitation of finer size alumina trihydrate", *Int J Miner Process*, Vol. 65, No. 2, pp. 109-124.
- Blanks, K. A., 2000, "Novel synthesis of gibbsite by laser-stimulated nucleation in supersaturated sodium aluminate solutions", *J Crystal Growth*, Vol. 220, No. 4, pp. 572-578.
- Brown, N., 1972, "Secondary nucleation of aluminium trihydroxide in seeded caustic aluminate solutions", *J Crystal Growth*, Vol. 16, No. 2, pp. 163-169.
- Ceyhan, A. A., Baytar, O. ve Pehlivan, E., 2014, "Effects of different gas phases and gas bubbles on the nucleation kinetics", *Acta Chim. Slov.*, Vol. 61, No. 1, pp. 391-397.
- Harris, D. R., Keir, R. I., Prestidge, C. A. ve Thomas, J. C., 1999, "A dynamic light scattering investigation of nucleation and growth in supersaturated alkaline sodium aluminate solutions (synthetic Bayer liquors)", *Colloid Surf A Physicochem Eng Asp*, Vol. 154, No. 3, pp. 343-352.
- Hayrapetyan, S., Mangasaryan, L., Tovmasyan, M. ve Khachatryan, H., 2006, "Precipitation of aluminum hydroxide from sodium aluminate, by treatment with formalin, and preparation of aluminum oxide", *Acta Chromatogr.*, Vol. 16, pp. 192.

- Kirchner, S., Teychene, S., Boualleg, M., Dandeu, A., Frances, C. ve Biscans, B., 2015, Effect of precipitation process parameters on boehmite properties: In situ optical monitoring, *Chem. Eng. J.*, Vol. 280, pp. 658-669.
- Li, H., Addai-Mensah, J., Thomas, J. C. ve Gerson, A. R., 2005a, "The influence of Al (III) supersaturation and NaOH concentration on the rate of crystallization of Al(OH)₃ precursor particles from sodium aluminate solutions", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 286, No. 2, pp. 511-519.
- Li, H., Lu, H. X., Wang, S., Jia, J. F., Sun, H. W. ve Hu, X., 2009a, "Preparation of a nano-sized alpha-Al₂O₃ powder from a supersaturated sodium aluminate solution", *Ceram. Int.*, Vol. 35, No. 2, pp. 901-904.
- Li, H. X., Addai-Mensah, J., Thomas, J. C. ve Gerson, A. R., 2005b, "The crystallization mechanism of Al(OH)₃ from sodium aluminate solutions", *J Crystal Growth*, Vol. 279, No. 3-4, pp. 508-520.
- Li, J., Yin, Z. L., Ding, Z. Y., Liu, W., Wei, T. R., Chen, Q. Y. ve Zhang, W. Y., 2016, "Homogeneous nucleation of Al(OH)₃ crystals from supersaturated sodium aluminate solution investigated by in situ conductivity", *Hydrometallurgy*, Vol. 163, pp. 77-82.
- Li, Y., Zhang, Y. F., Yang, C. ve Zhang, Y., 2009b, "Precipitating sandy aluminium hydroxide from sodium aluminate solution by the neutralization of sodium bicarbonate", *Hydrometallurgy*, Vol. 98, No. 1-2, pp. 52-57.
- Liu, G. H., Li, Z., Qi, T. G., Zhou, Q. S., Peng, Z. H. ve Li, X. B., 2015, "Continuous changes in electrical conductivity of sodium aluminate solution in seeded precipitation", *T Nonferr Metal Soc*, Vol. 25, No. 12, pp. 4160-4166.
- Mejdell, G. T. ve Kjolberg, S. A., 1977, "Process for precipitation of aluminum hydroxide from aluminate solution", Google Patents: US4049773A.
- O'hare, D. M., Fogg, A. M. ve Parkinson, G. M., 2002, Process for removing impurities from bauxite, Google Patents: US6479024B1.
- Rasmussen, D. H., Brancewicz, C., Das, B., Graeffe, M., Rosenholm, J. ve Toscano, A., 2001, "Precipitation of nanoscale aluminum hydroxide particles", *J Disper Sci Technol*, Vol. 22, No. 5, pp. 491-498.
- Rossiter, D., Fawell, P., Ilievski, D. ve Parkinson, G., 1998, "Investigation of the unseeded nucleation of gibbsite, Al (OH) ₃, from synthetic bayer liquors", *J Crystal Growth*, Vol. 191, No. 3, pp. 525-536.
- Ruan, S., Shi, L. N., Li, J. ve Gerson, A. R., 2016, "Mechanism and kinetics of gibbsite-seeded sodium aluminosilicate crystallisation from synthetic spent Bayer liquor", *Hydrometallurgy*, Vol. 163, pp. 1-8.
- Skoufadis, C., Panyas, D. ve Paspaliaris, I., 2003, "Kinetics of boehmite precipitation from supersaturated sodium aluminate solutions", *Hydrometallurgy*, Vol. 68, No. 1-3, pp. 57-68.
- Veesler, S. ve Boistelle, R., 1993, "About supersaturation and growth rates of hydrargillite Al (OH)₃ in alumina caustic solutions", *J Crystal Growth*, Vol. 130, No. 3-4, pp. 411-415.
- Wilhelmy, R. B., 1990, "Control of form of crystal precipitation of aluminum hydroxide using cosolvents and varying caustic concentration, Google Patents: US4900537A.
- Yamada, K., Harato, T., Kato, H. ve Shiozaki, Y., 1982, Process for producing coarse grains of aluminum hydroxide, Google Patents: US4311486A.
- Zeng, J. S., Yin, Z. L. ve Chen, Q. Y., 2007, "Intensification of precipitation of gibbsite from seeded caustic sodium aluminate liquor by seed activation and addition of crown ether", *Hydrometallurgy*, Vol. 89, No. 1-2, pp. 107-116.
- Zhang, Y., Zheng, S. L., Du, H., Xu, H. B., Wang, S. N. ve Zhang, Y., 2009, "Improved precipitation of gibbsite from sodium aluminate solution by adding methanol", *Hydrometallurgy*, Vol. 98, No. 1-2, pp. 38-44.



KONUT YAPILARININ MALİYET TAHMİNİNDE KULLANILAN YÖNTEMLERİN PERFORMANS ANALİZİ

¹Mehmet Şükrü ÖZMADEN , ²Mürsel ERDAL 

¹Millî Savunma Bakanlığı, Bütçe ve Mali Hizmetler Genel Müdürlüğü, Fiyat ve Maliyet Analiz Dairesi
Başkanlığı, Ankara, TÜRKİYE

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara, TÜRKİYE
¹mehmet.ozmaden@msb.gov.tr, ²merdal@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 02.05.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 10.06.2020)

ÖZ: Maliyet tahmini, yatırım kararlarını ve projenin kapsamını etkilemesi açısından işin başında yapılacak fizibilite çalışmalarının belki de en önemli kısmını oluşturmaktadır. Literatürde yapı maliyetlerinin çeşitli tahmin yöntemleri ile belirlenmesi kapsamında yapılmış çalışmalar bulunsa da, bu yöntemlerin geniş çaplı bir performans analizinin yapılmasına yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışma kapsamında; konut yapılarının maliyet tahmininde kullanılan gelişmiş tahmin yöntemlerinden altı farklı regresyon modeli, dört farklı makine öğrenmesi modeli ve Bulanık Uzman Sistem Tasarımı olmak üzere toplam on bir adet tahmin modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller üç farklı performans kriteri (Ortalama Hata Karesi, Ortalama Mutlak Yüzde Hatası ve Determinasyon Katsayısı) ile analiz edilerek en iyi tahmini yapan yaklaşım araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Konut yapıları, maliyet tahmini, regresyon analiz modelleri, makine öğrenmesi, bulanık uzman sistem tasarımı, performans analizi.

Performance Analysis of Methods Used in the Cost Estimation of Residential Buildings

ABSTRACT: Cost estimation is perhaps the most important part of the feasibility studies to be carried out at the beginning of the project in order to affect the investment decisions and the scope of the project. Although there are studies in the literature to determine the construction costs with various estimation methods, there is no study for a comprehensive performance analysis of these methods. This scope of work; A total of eleven prediction models, six different regression models, four different machine learning models and Fuzzy Expert System Design, were developed from the advanced estimation methods used in the cost estimation of residential buildings. The created models were analyzed with three different performance criteria (Mean Squared Error, Mean Absolute Percentage Error and Coefficient of Determination) and the best estimating approach was investigated.

Keywords: Residential structures, cost estimate, models of regression analysis, machine learning, fuzzy expert system, performance analysis.

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir inşaat projesinde başarı, kaynakların etkin kullanımı ile projenin planlanan zamanda ve bütçe limitini aşmayacak biçimde istenen kalitede gerçekleştirilmesine bağlıdır. İnşaat sektörünün, iç ve dış birçok faktörün etkisinde olan ve özellikleri gereği birçok belirsizlikleri içeren bir sektör olduğu düşünüldüğünde, bu faktör ve belirsizliklerin olası olumsuz etkilerinin minimize edilerek hedeflenen

başarıya ulaşılması için işin başında yapılacak fizibilite çalışmalarının ne kadar önemli olduğu açıktır. Maliyet tahmini, yatırım kararlarını ve proje kapsamını etkilemesi açısından bu fizibilite çalışmalarının belki de en önemli kısmını oluşturmaktadır (Kuruoğlu ve diğ., 2011; Kanıt ve diğ., 2005).

Bu çalışmada yapı maliyet tahmini için farklı bakış açılarına sahip üç yaklaşım kullanılarak en iyi tahmini yapan yaklaşım araştırılmıştır. Bu amaçla belirlenen yaklaşımlar; regresyon modelleri, makine öğrenmesi ve bulanık mantıktır.

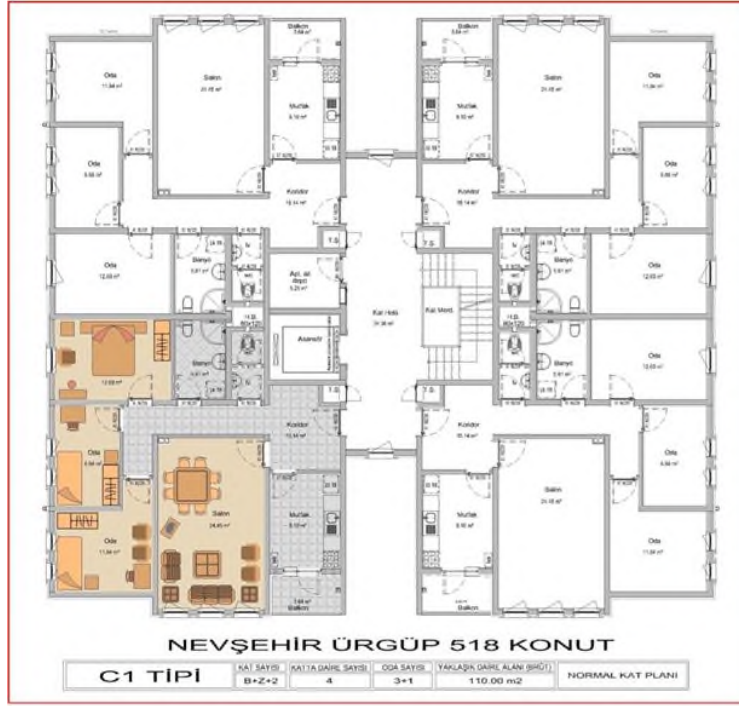
Tahmin modelleri için; TOKİ ve TÜRKONUT'tan sağlanan 63 adet betonarme taşıyıcı sistemli ve bitişik olmayan çok katlı toplu konut projesinden bina tanımlayıcı özelliklerine ait veriler ile 2019 yılına ait gerçekleşen maliyet verileri esas alınmıştır. Analizlerde, girdi olarak sekiz adet bina tanımlayıcı özelliği ve çıktı olarak da maliyet değişkeni kullanılmış ve Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca, bina tanımlayıcı özelliklerine ait tüm veriler Ek 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Analizlerde kullanılan bina tanımlayıcı özellikleri

Table 1. Building descriptive features used in analysis

GİRDİ	X ₁	Cephe yüksekliği (m)
	X ₂	Bir kattaki daire sayısı (ad)
	X ₃	Toplam daire sayısı (ad)
	X ₄	Tip kat alanı (m ²)
	X ₅	Cephe alanı (m ²)
	X ₆	Cephe boşluk alanı (m ²)
	X ₇	Kat sayısı (ad)
	X ₈	Ortalama daire alanı (m ²)
ÇIKTI	M	Maliyet (TL)

TOKİ'ye ait projeler "tip proje" mahiyetinde olup Türkiye'nin çeşitli illerinde 548 ayrı projede uygulanmış ve halen pek çok projede de uygulanmaktadır. TÜRKONUT'a ait projeler ise Ankara, Eryaman'da, 20 adet konut adası üzerinde 185 adet bloktan oluşan ve 46 ayrı tip projenin uygulandığı bölgede yapılmıştır (Uğur ve diğ., 2019). TOKİ tip projelerine ait kat planı örneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. TOKİ projeleri ait örnek kat planı

Figure 1. Sample floor plan of TOKI projects

Model oluştururken eğitim ve test kümesinin seçimi ile oluşacak analiz sonuçlarının olumlu veya olumsuz yönde etkilenmesini engellemek, veri bağımlılığını (korelasyon) ve aşırı öğrenmeyi (overfitting) ortadan kaldırmak amacıyla regresyon modelleri ve makine öğrenmesi metotlarında K katlamalı çapraz geçerlilik kullanılmıştır.

K Katlamalı Çapraz Geçerlilik (K-Fold Cross Validity)

Veri kümesi rassal olarak 10 parçaya ayrılmış ve bunlar 10 katlamalı çapraz geçerlilik için kullanılmıştır. Her seferinde bir parça (alt küme) ayrılmış ve kalan dokuz alt küme ile belirtilen yöntemler dikkate alınarak model oluşturulmuştur. Ayrılan bir parça ile de oluşturulan modelin performansı ölçülmüştür. Oluşturulan 10 farklı eğitim ve test kümesi için, önceki kısımlarda bahsedilen regresyon temelli yöntemler ve makine öğrenmesi yöntemleri ile 10 ayrı model oluşturulmuştur. Böylece her veri hem model kurmada hem de model test etmede kullanılmış ve yöntemlerin genel bir model oluşturma kabiliyeti de test edilmiştir (Kaya, 2014).

Seçilen performans kriterlerine göre (OHK: Ortalama hata karesi, OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata, R²) yöntemlerin 10 seferdeki ortalama başarıları dikkate alınarak elde edilen en iyi modelleri çıkarabilen yöntem seçilmiştir.

REGRESYON MODELLERİ İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH REGRESSION MODELS)

Regresyon analizi iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan bir analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılarak regresyon yapılıyorsa çok değişkenli regresyon olarak isimlendirilmektedir. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve gücü hakkında bilgi edinilebilmektedir. Normal dağılımlı iki değişken arasında doğrusal ilişki olup olmadığı "Basit Lineer Regresyon Analizi" ile test edilmektedir. Ancak birbirleriyle de etkileşim içinde olan birden fazla değişkenin bir değişkeni etkilediği durumlarda tek değişkenli regresyon analizi yerine çok değişkenli regresyon analizi kullanılmaktadır (Yılmaz ve diğ.,2016).

Çalışma kapsamında dört farklı Lineer Regresyon modeli, Genelleştirilmiş Lineer Regresyon (GLR) ve En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) olmak üzere aşağıda listelenen toplam altı farklı regresyon modeli oluşturulmuştur.

Girne Lineer Regresyon (Bayram, 2013)

Adımsal Lineer Regresyon (İyi, 2006)

İleriye Doğru Seçim Lineer Regresyonu (İyi, 2006)

Geriye Doğru Seçim Lineer Regresyonu (İyi, 2006)

Genelleştirilmiş Lineer Model (GLM) (Koç ve Cengiz, 2012)

En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) (Tümer, 2010)

Regresyon Yöntemlerinin Sonuçları (Results of Regression Models)

Regresyon tabanlı yöntemler K katlamalı çapraz geçerlilik ile test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında K=10 alınmıştır. Altı farklı yöntem ile toplam 60 adet model oluşturulmuş ve bunlar OHK (Ortalama Hatanın Karesi), OMHY (Ortalama Mutlak Yüzdese Hata) ve Determinasyon (Belirlilik) Katsayısı (R^2) performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar eğitim ve test olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim kümesi sonuçları modellerin başarılı oluşturulup oluşturulmadığını göstermekte, test sonuçları ise oluşan modellerin genelleme yeteneğini göstermektedir.

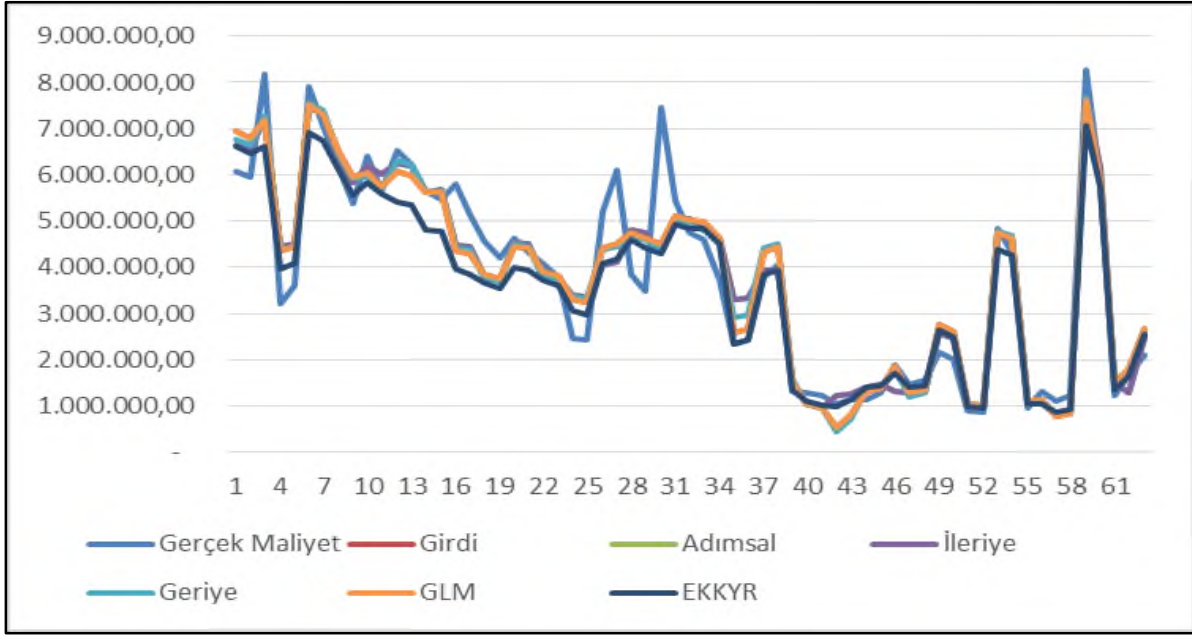
Eğitim verisi için OHK değerleri incelendiğinde, Genelleştirilmiş Lineer Modelin (GLM) diğerlerinden belirgin şekilde yüksek OHK değerine sahip olduğu görülmüş ve bu nedenle iyi bir maliyet tahmini yapamadığı değerlendirilmiştir. Test verileri de bunu teyit etmiştir.

OMHY yüzde olarak hatanın önemli olduğu uygulamalarda ön plana çıkan bir performans kriteridir ve özellikle parasal değerlerin tahmin edildiği uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışma kapsamında en önemli performans kriteri olarak düşünülmüştür.

Eğitim verisi için OMYH değerleri incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle GLM modelinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verilerine bakılmış ve burada da benzer bir durumla karşılaşmıştır. Bundan dolayı tahmin modeli için GLM yönteminin uygun olmadığı söylenebilir. Bu noktada En Küçük Kareler Yüzde Regresyonu (EKKYR) yöntemi öne çıkmaktadır. Eğitim ve test verileri sonuçlarına göre en küçük hata yüzdesini EKKYR modellerinin sunduğu görülmüştür.

İstatistiksel açıklamada kullanılan bir diğer performans kriteri de R^2 değeridir. Bu çalışmada eğitim verisi ile elde edilen R^2 değerlerinden diğer kriterlerde olduğu gibi GLM modellerinin öğrenemediği negatif R^2 değerleri ile görülmektedir.

Test verisi için Determinasyon (Belirlilik) Katsayısı (R^2) değerleri incelendiğinde negatif R^2 değerleri nedeniyle Genelleştirilmiş Lineer Modelin (GLM) öğrenemediği görülmüştür. Bu noktada Geriye doğru seçim, girdi lineer regresyon ve EKKYR yöntemleri ön plana çıkmıştır. Regresyon modellerinin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Regresyon modelleri maliyet karşılaştırma grafiği
Figure 2. Regression models cost comparison chart

Önerilen Regresyon Modeli (Proposed Regression Model)

Bu çalışma kapsamında 10 çapraz geçerlilik kümesi için altı farklı yöntem ile toplam 60 adet model oluşturulmuş ve bu modeller OHK, OMHY ve R^2 performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. OMHY kriteri ile en iyi performansı sergileyen EKKYR yöntemi ile verilerin tamamı kullanılarak yeniden bir model oluşturulmuştur. Bu modelin beklenen hata değeri, 10 katlamalı çapraz geçerlilikteki ortalama hatasıdır. Böylece hangi yöntemin seçileceği kararlaştırılmış ve seçilen yöntem ile tüm veriler kullanılarak bir model oluşturulmuştur.

Tüm veriler kullanılarak oluşturulan ve bu çalışma kapsamında önerilen EKKYR tahmin modeli aşağıda formül (1)'de verilmiştir.

$$M = (1961792,718) + (83822,212 \times X_1) - (746182,343 \times X_2) - (14967,210 \times X_3) + (6232,631 \times X_4) + (459,887 \times X_5) + (4716,517 \times X_6) - (217869,098 \times X_7) - (14726,868 \times X_8) \dots \dots \dots (1)$$

MAKİNE ÖĞRENMESİ YÖNTEMLERİ İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH MACHINE LEARNING METHODS)

Makine öğrenmesinin temel dayanağı, giriş verisini alabilen algoritmalar oluşturmak ve çıktılarını yeni veriler ortaya çıktıkça güncellerken bir çıktıyı tahmin etmek için istatistiksel analiz kullanmaktır (Cankıran, 2020)

Çalışma kapsamında iki farklı Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli (ÇKA), Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları (RTFA) ve Destek Vektör Makineleri (DVM) olmak üzere aşağıda listelenen toplam dört farklı model oluşturulmuştur.

- Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA)
 - 1 Gizli katmanlı ÇKA (Uğur, 2007), (Bayram, 2013)
 - 2 Gizli katmanlı ÇKA (Sarıdemir, 2008)
- Radyal Tabanlı Fonksiyon Ağları (RTFA) (Bayram, 2013)
- Destek Vektör Makineleri (DVM) (Namlı, 2012), (Yolasığmaz, 2015)

ÇKA, geri-yayılım öğrenme sistemini kullanan ve sıklıkla sınıflandırma için uygulanan yapay sinir ağının bir sınıfıdır. Bir giriş katmanı, bir veya daha fazla saklı katman ve bir çıkış katmanından oluşan

ÇKA ağı eğitimi, tanımlanan hata fonksiyonunun minimizasyonu şeklinde ifade edilen bir süreçtir (Keleş, 2018).

RTFA, girdi veri kümesinin özel olarak belirli bir bölgesine düşen değerler için en büyük değerini alan ve bu noktadan uzaklaştıkça daha küçük değerler üreten fonksiyonlar olup denetimli öğrenme kapsamında değerlendirilen ileri beslemeli bir YSA (Yapay Sınır Ağları) modelidir (Keleş, 2018).

DVM, istatistiksel öğrenme teorisi ve yapısal riski en aza indirme ilkesine dayanan, sınıflandırma ve regresyon problemlerinin çözümü amacıyla ortaya atılmış bir öğrenme yöntemidir. Herhangi bir sınıflandırma ya da regresyon problemini, bir karesel programlama problemine dönüştürerek yerel çözümlere takılmadan çözer (Eray, 2008).

Makine öğrenmesi yöntemleri kara kutu (black box) olmaları nedeniyle oluşturdukları modeller, regresyon modellerindeki gibi tam olarak anlamlandırılmamaktadır. Bu sebeple doğruluklarının tespiti için genellikle çapraz geçerlilik yöntemi ile istatistiksel incelemeye tabi tutulmaktadır.

Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Karşılaştırılması (Comparison of Machine Learning Methods)

Makine öğrenmesi yöntemleri ve regresyon tabanlı yöntemler K katlamalı çapraz geçerlilik ile test edilmiştir. Bu çalışma kapsamında K=10 alınmıştır. 10 farklı yöntem ile toplam 100 adet model oluşturulmuş ve bunlar OHK, OMHY ve R² performans kriterleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, eğitim ve test olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Eğitim kümesi sonuçları modellerin başarılı oluşturulup oluşturulmadığını göstermekte, test sonuçları ise oluşan modellerin genelleme yeteneğini göstermektedir.

Eğitim verisi için OHK değerleri incelendiğinde yüksek OHK değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verilerine bakılmış ve burada da benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Böylece tahmin modeli için DVM yönteminin uygun olmadığı söylenebilir.

Test verisi için de benzer şekilde yüksek OHK değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği belirlenmiştir. ÇKA ve RTFA modellerinin karşılaştırılması sonucunda OHK test verisine göre ÇKA 2 Gizli Katmanlı modelin nispeten daha iyi olduğu söylenebilir.

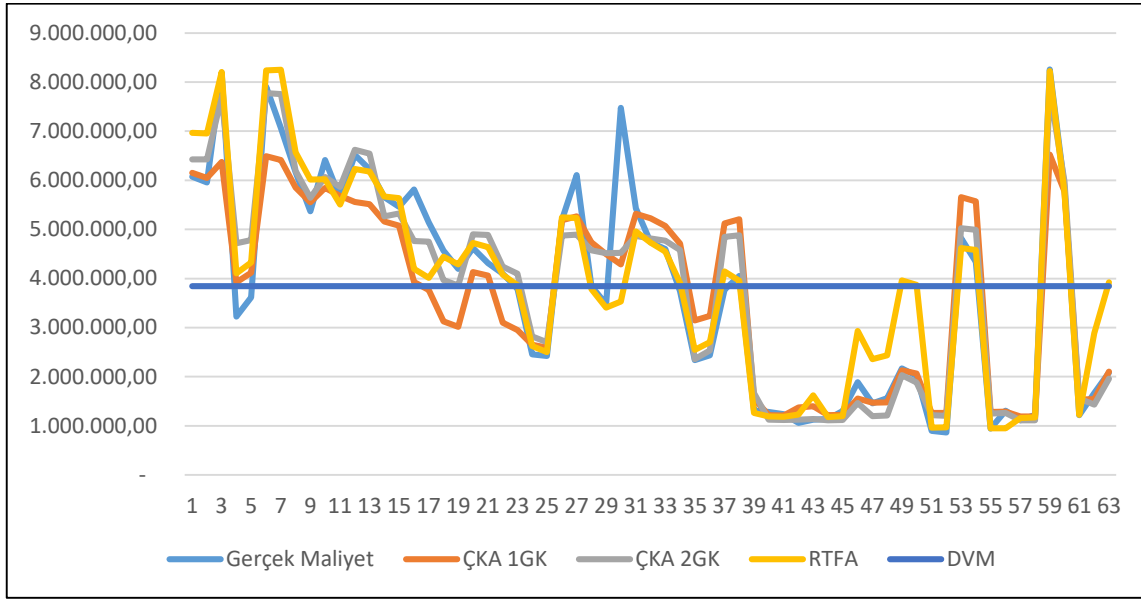
OMHY diğer bir performans kriteridir ve yüzde olarak hatanın önemli olduğu uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Bunlardan biri de parasal değerlerin tahmin edildiği uygulamalardır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında en önemli performans kriteridir.

Eğitim verisi için OMYH değerleri tablosu incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle GLM ve DVM modellerinin öğrenemediği ve iyi bir tahmin modeli sunmadığı görülmüştür. Bu durumu teyit için test verisine bakılmış ve burada da benzer bir durum görülmüştür. Böylece tahmin modeli için GLM ve DVM yöntemlerinin de uygun olmadığı söylenebilir.

Test verisi için OMYH değerleri tablosu incelendiğinde yüksek OMYH değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği görülmüştür. ÇKA ve RTFA modellerinin OMYH test değerlerinin karşılaştırılması ile ÇKA 1 Gizli Katman modelinin daha iyi tahminlerde bulunduğu değerlendirilmiştir.

İstatistiksel açıklamada kullanılan bir diğer performans kriteri de R² değeridir. Temel olarak veriyi (bağımlı değişkeni) tek bir değer, ortalama ile temsil etmeye göre tahmin modelinin ne kadar performans sağladığını gösterir. Bu çalışmada eğitim verisi ile elde edilen R² değerleri incelendiğinde, diğer kriterlerde olduğu gibi DVM modelinin öğrenemediği negatif R² değerleri ile anlaşılmıştır.

Test verisi için R² değerleri incelendiğinde negatif R² değerleri nedeniyle DVM modelinin öğrenemediği görülmüştür. R² performans değerine göre ÇKA ve RTFA karşılaştırıldığında ise ÇKA 1 Gizli Katmanlı modelin daha iyi tahminlerde bulunduğu belirlenmiştir. Makine öğrenmesi yöntemlerinin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Makine öğrenmesi modelleri maliyet karşılaştırma grafiği
Figure 3. Machine learning models cost comparison chart

BULANIK UZMAN SİSTEM TASARIMI İLE MALİYET TAHMİNİ (COST ESTIMATION WITH FUZZY EXPERT SYSTEM DESIGN)

Bu bölümde bulanık uzman sistem ile maliyet tahmini yapılmaktadır. Bu amaçla öncelikle uzman görüşleri alınarak belirlenen sekiz kriter incelenmiştir. Uzmanların görüşleri doğrultusunda sekiz kriterden dördünün diğer kriterlerin etkisinde olduğu ve maliyet tahmininde etkili olmadığı kanaati ortaya çıkmıştır.

Çıkarılan dört kriter: X1: Cephe yüksekliği, X2: Bir kattaki daire sayısı, X3: Toplam daire sayısı ve X7: Kat sayısı'dır. Bulanık sistem tasarımında dikkate alınacak kriterler ise X4: Tip kat alanı, X5: Cephe alanı, X6: Cephe boşluk alanı ve X8: Ortalama daire alanı'dır. Son üç kriterin (X2, X3, X7) çıkarılmasında bu kriterlerin tam sayı olması nedeniyle bulanıklaştırmaya uygun olmaması da etkili olmuştur.

Temel alınan dört kriter için uzman görüşleri alınarak maliyet tahmini imkanı sağlayan bulanık uzman sistem tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan sistemin model yapısı Baykal ve Beyan'ın (Baykal ve Beyan, 2004) modelinden uyarlanmıştır ve Şekil 4'de verilmiştir.

Kesin girdi: 63 adet bina tanımlayıcı kriteri ve maliyet değerlerinden oluşmaktadır.

Bulanıklaştırma: Her bir kriter ve maliyet için kategoriler belirlenmekte ve üçgen bulanık sayılar yardımıyla bu kategorilerin sınırları uzman görüşleri doğrultusunda tespit edilmiştir. Bulanıklaştırmada kriterler için dört kategori ve maliyet için altı kategori belirlenmiştir.

Bulanık girdi: Kesin girdilerin denk geldiği kategoriler belirlenmiştir.

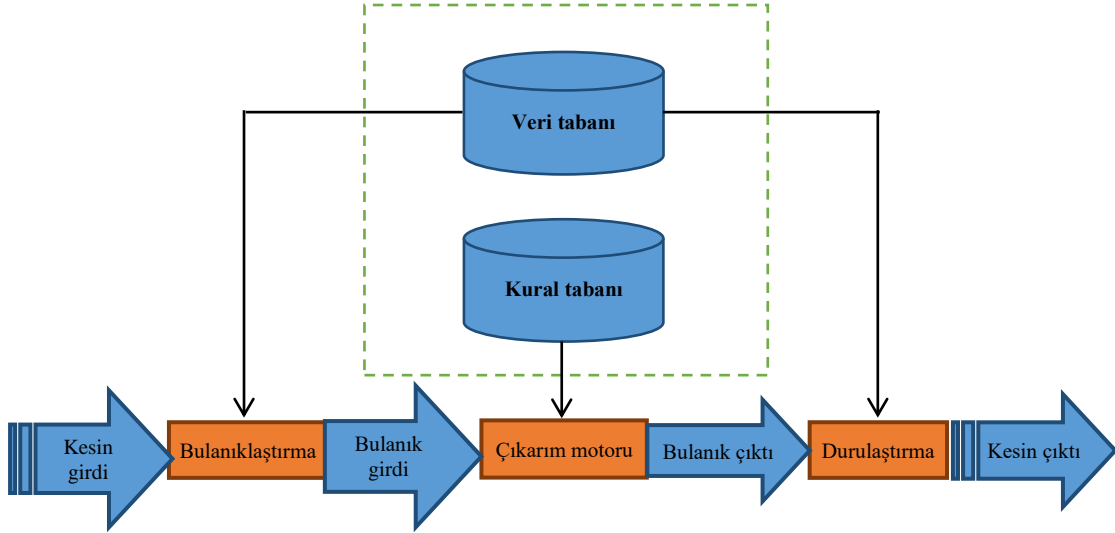
Kural Tabanı: Veri tabanındaki girişleri, çıkış değişkenlerine bağlayan IF (EĞER) – THEN (İSE) türünde yazılabilen bütün kuralları içerir. Bu çalışmada dört kriter için $4 \times 4 \times 4 \times 4 = 256$ adet bulanık kural yazılabilmektedir (Yılmaz, 2012).

Çıkarım motoru: Her bir kuralın çıkarımlarını bir araya getirerek tüm sistemin girdiler altında nasıl bir çıktı vereceğinin belirlenmesine yarayan birimdir.

Bulanık Çıktı: Bulanık kural tabanının, bulanık çıkarım motorunun etkileşimi sonunda elde edilen çıktı değerlerini vermektedir.

Durulaştırma (Defuzzification): Durulaştırma için duruma göre farklı yaklaşımlardan yararlanılabilir. Genellikle, ağırlık merkezi (centroid), açıortay (bisector), en büyükün ortası (MOM), en büyükün genişliği (LOM) ve en büyükün küçüğü (SOM) yöntemleri kullanılmaktadır. En çok tercih edilen yöntem hiç kuşkusuz ağırlık merkezi (centroid) yöntemidir.

Kesin çıktı: Durulaştırma işleminden sonra girilen dört kriter değeri için tahmin edilen maliyet değerini gösterir. Maliyet değeri bulanıklıktan uzak tamamen kesin bir değerdir.



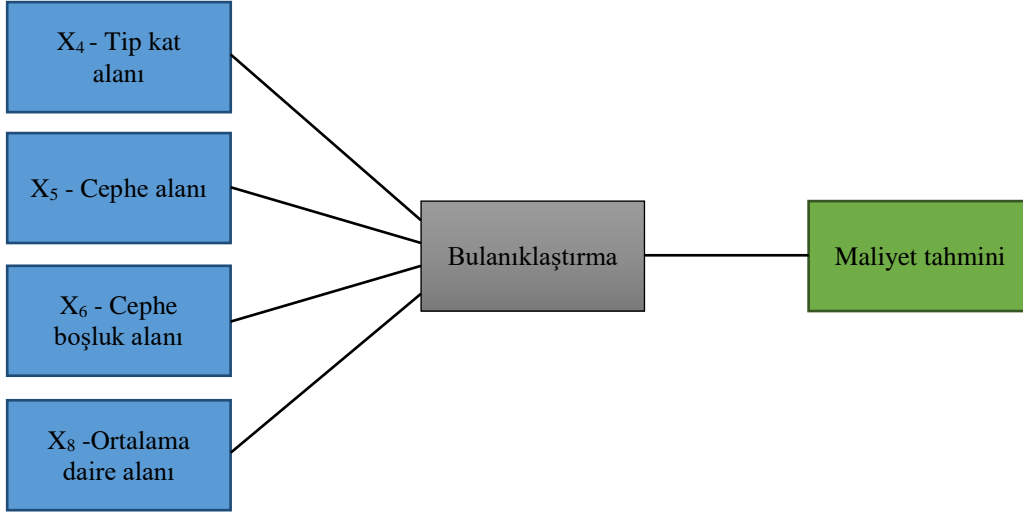
Şekil 4. Bulanık uzman sistem tasarımı

Figure 4. Fuzzy expert system design

Sistem Giriş-Çıkış Değişkenleri (Variables of System Input-Output)

Sistemde ihale maliyeti hesaplanması amacıyla dört girdi ve bir çıktı değişkeninden oluşan girdi-çıkı yapı kullanılmıştır (Şekil 5).

Bu yapıya göre ilk olarak sistemin giriş ve çıkışları için uygun sayısal aralıklar oluşturulur ve her aralık için kategoriler bulunarak eşleştirilir. Kriterlere ait veriler incelendiğinde kriterlerin üçgensel bulanık fonksiyonlarla ifade edilebileceği görülmektedir (Biçer ve diğ.,2019).



Şekil 5. Girdi-çıkı yapıları
Figure 5. Input-output chart

Maliyet Tahmini (Cost Estimation)

Maliyet tahmini için Matlab R2013b programı kullanılmıştır. Programa her bir kriter ve maliyet çıktısı için üyelik fonksiyonları girilmiş, bulanık kurallar tanımlanmış ve daha sonra 63 adet ihale verisi girdi olarak kullanılarak maliyet tahmini yapılmıştır.

Tüm veriler bulanık uzman sisteme girilerek çıkarım mekanizması Mamdani tekniği ve durulaştırma yöntemi ağırlık merkezi seçilerek maliyet tahminleri elde edilmiştir (Öz, 2012). Durulaştırma için ağırlık merkezi yöntemi haricindeki diğer yöntemlerde denenerek gerçek maliyete en yakın sonucu veren yöntem ve tahmini maliyet değerleri belirlenmiştir.

Maliyet Tahmininin Değerlendirmesi (Evaluation of Cost Estimation)

Bulanık uzman sistem ile maliyet tahmin değerlendirme yapabilmek amacıyla ortalama hata karesi (OHK, MSE: Mean Square Error), Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (OMYH, MAPE: Mean Absolute Percentage Error) ve R^2 metrikleri hesaplanmıştır.

Çizelge 2’de durulaştırma yöntemi ağırlık merkezi ve en iyi maliyet tahminini veren durulaştırma yöntemine göre (centroid, bisector, mom, lom, som) OHK, OMYH ve R^2 metrikleri sunulmuştur. Her üç metrik dikkate alındığında durulaştırma yöntemine göre en iyi maliyet tahminini veren yaklaşım daha iyi sonuçlara sahiptir.

Çizelge 2. Bulanık uzman sistem hata metrikleri

Table 2. Fuzzy expert system error metrics

Metrik	Tahmini Maliyet (centroid)	En İyi Maliyet Tahmini (En iyi durulaştırma yöntemi)
OHK	5,70496E+11	2,67663E+11
OMYH	% 15,5908	% 8,4729
R^2	0,875366	0,943529

OHK metriğine göre ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile bulunan maliyet tahminlerine ait OHK değeri 5,70496E+11 ve tüm beş durulaştırma yönteminden en iyi maliyet tahminini veren yaklaşımın OHK değeri ise 2,67663E+11’dir. OHK metriğine göre düşük olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir. OMYH metriğine göre ağırlık merkezi durulaştırma yöntemi ile bulunan maliyet

tahminlerine ait OMYH % 15,5908 ve tüm beş durulaştırma yönteminden en iyi maliyet tahminini veren yaklaşımın OMYH yüzdesi ise % 8,4729'dur. OMYH metriğine göre düşük olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir. R² metriğine göre birinci yaklaşım 0,875366 iken, ikinci yaklaşım ise 0,943529'dur. R² metriğine göre ise yüksek olan değer daha iyi yaklaşımı göstermektedir.

Mevcut 63 ihale verisi için bir değerlendirme yapıldığında her ne kadar en iyi maliyet tahminini veren durulaştırma yöntemi ile daha iyi maliyet tahmini yapılsa da yeni ihaleler için bir tahminde bulunmak gerektiğinde sadece bir durulaştırma yöntemi seçilmek zorundadır. Bu sebeple ağırlık merkezi (centroid) yöntemi ile bulanık uzman sistem tasarımını tercih etmek daha doğru sonuçlar verecektir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Genel anlamda regresyon modelleri, makine öğrenmesi ve bulanık uzman sistemler ile maliyet tahmin sonuçları hata metrikleri dikkate alınarak mukayese edilmektedir. Altı farklı regresyon modelinden en iyi sonuçları veren EKKYR, makine öğrenmesi yaklaşımlarından en iyi maliyet tahminlerini yapan ÇKA ve bulanık uzman sistem (BUS) yaklaşımı olmak üzere bu üç yöntem karşılaştırılmıştır.

Her üç yaklaşımdan hangisinin daha iyi maliyet tahmini yaptığını bulabilmek amacıyla OHK, OMYH ve R² hata metrikleri karşılaştırılmıştır. EKKYR, ÇKA ve BUS metotlarıyla yapılan maliyet tahmin değerleri Ek 2'de, hata metrikleri özet tablosu ise Çizelge 3'te sunulmuştur.

Çizelge 3. Yöntemlerin hata metriklerine göre karşılaştırılması

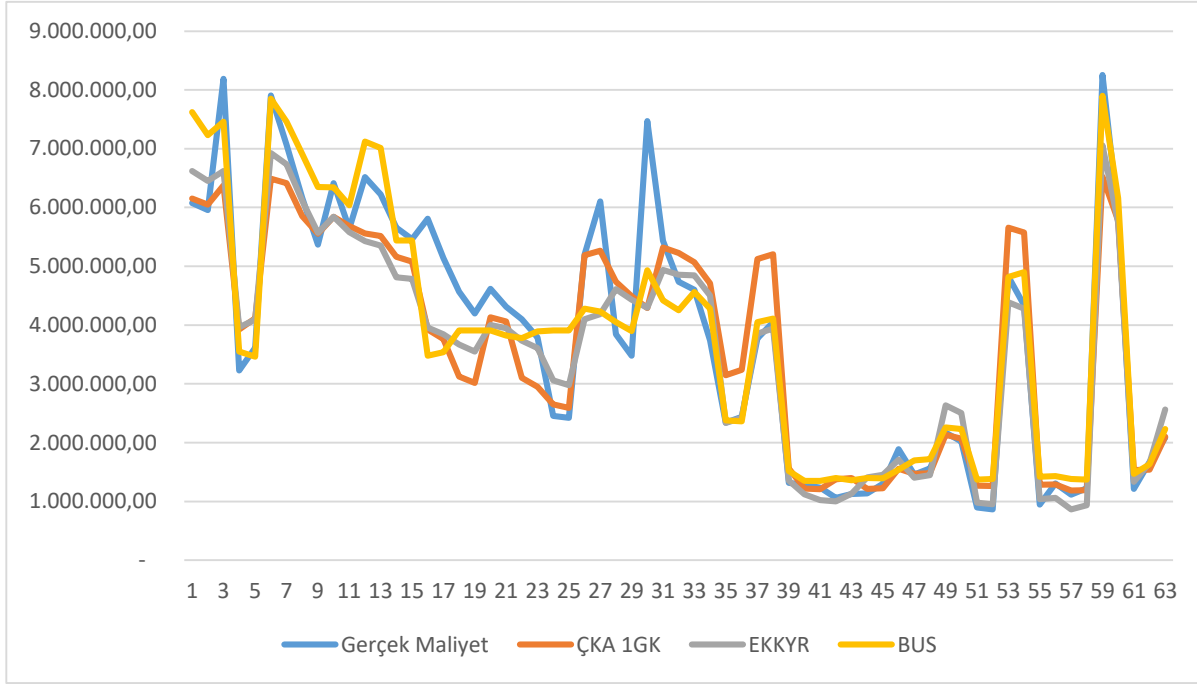
Table 3. Comparison of methods by error metrics

	OHK	OMYH	R ²
EKKYR	5,75096E+11	13,0%	0,892
ÇKA	7,03982E+11	15,7%	0,845
BUS	5,70005E+11	15,6%	0,875

Çizelge 3 incelediğinde; ÇKA metodu her üç hata metriği için en uzak değerlere sahiptir ve diğer iki yönteme göre daha uzak maliyet tahmini yaptığı söylenebilir. Bu durumda geriye kalan EKKYR ve BUS yaklaşımlarının OHK metriğine göre %0,885'lik $[(5,75096E+11-5,70005E+11)/5,75096E+11]$ bir fark ile BUS yönteminin nispeten daha iyi bir tahmin yaptığı söylenebilir. OMYH metriğine göre EKKYR yöntemi %2,6'lık bir farkla daha iyi bir tahminde bulunmuştur. R² metriğine göre ise %0,017'lik bir farkla EKKYR yöntemi daha iyi bir tahmin yapmıştır.

Maliyet gibi bir ölçüt için yani parasal değerlerin tahmin edildiği durumlarda OMYH hata metriğinin dikkate alınması daha uygun görüldüğünden ve üç metrikten ikisinde EKKYR'nin daha iyi tahmin yaptığı ortaya çıktığından ihale maliyet tahmininde EKKYR yönteminin daha başarılı olduğu söylenebilir.

Diğer yandan BUS yaklaşımında sekiz kriter değil de sadece dört kriter girdi olarak alınarak maliyet tahmini yapılmıştır. Başka bir deyişle sekiz kriterin tümünü dikkate almadan daha az girdi ile maliyet tahmini yapılmıştır. Ancak kuşkusuz BUS yönteminin uygulanabilmesi için hazırlık aşaması oldukça zaman alıcıdır. Uzman görüşleri alınarak kriterler azaltılmış, her bir kriter ve maliyet değişkeni için ayrı ayrı üyelik fonksiyonları oluşturulmuş, bulanık kural tabanı tanımlanmış ve maliyet tahmini yapılmıştır. Buna karşın EKKYR modelinde tüm kriterler dikkate alınmakta, modelin uygulanabilmesi için hazırlık aşaması nispeten daha kısa sürmekte ve daha az çaba gerektirmektedir. Gelecekte yeni ihale verileri için bir maliyet tahmini ihtiyacı ortaya çıktığında EKKYR modelinin sadece doğruluk açısından değil uygulama kolaylığı olarak da daha iyi bir seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Her üç yaklaşımdan seçilen modellerin maliyet tahmin performansını gösteren maliyet eğrileri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Seçilen modellerin maliyet tahmin performansı grafiği

Figure 6. Cost estimation performance chart of selected models

Sonuç olarak, altı regresyon modeli, dört makine öğrenmesi yöntemi ve bir bulanık mantık yaklaşımı olmak üzere toplam 11 farklı tahmin metodundan en iyi tahmini sağlayan modelin EKKYR olduğu görülmüştür ve bu model formül (1)'de verilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Baykal, N., Beyan, T., 2004, "Bulanık Mantık Uzman Sistemler ve Denetleyiciler", Bıçaklar Kitapevi, Ankara, 191.
- Bayram, S., 2015, "Türkiye Kamu İnşaat Projelerindeki Maliyet Ve Süre Sapmalarının Yapay Zekâ Yöntemleri ile Kıyaslamalı Analizi", Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Biçer, E.B., Arslan, Ö., Biyan, M., 2019, "Bulanık Mantık Yöntemiyle Maliyet Tespiti: Bir Üniversite Hastanesi Örneği", İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, Ekim 2019, Cilt:33, Sayı:4, ss. 1137-1152.
- Cankıran, C., "Makine Öğrenimi Nedir" <https://www.cankıran.com/makine-ogrenimi/>, ziyaret tarihi: 02 Mayıs 2020.
- Eray, O., 2008, "Destek Vektör Makineleri ile Ses Tanıma Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- İyi, P., 2006, "Genetik Algoritma Uygulanarak ve Bilgi Kriterleri Kullanılarak Çoklu Regresyonda Model Seçimi", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Kanıt, R., Baykan, U.N., Erdal, M., (2005), Kısıtlı Kaynak Koşullarının Yapı Maliyetine Etkisinin İncelenmesi, Politeknik Dergisi, 8 (2), ss.209-221.
- Kaya, E., 2014, "Genetik Algoritma ile Bulanık Kural Kümesinin Otomatik Olarak Oluşturulmasında Yeni Bir Yaklaşım", Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Keleş, A.E., Keleş, M.K., 2018, "Genetik Algoritma ile Öznitelik Seçimi Kullanılarak Yapım Yönetiminde Çalışan Liderlik Algısının Tahmini", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33(4), ss. 97-110.

- Koç, T., Cengiz, M.A., 2012, "Genelleştirilmiş Lineer Karma Modellerde Tahmin Yöntemlerinin Uygulamalı Karşılaştırılması", *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2 (2), ss. 47-52.
- Kuruoğlu, M., Çelik, L.Y., Topkaya, E., Yönez, E., 2011, *İnşaat Sektöründe Kullanılan Ön Maliyet Tahmin Yöntemlerinin Karşılaştırılması*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 6. İnşaat Yönetimi Kongresi, 2011.
- Namli, E., 2012, "Proje Yönetimi Kapsamında Risk Tabanlı ve Yapay Zekâ Destekli Bir Maliyet Tahmin Modeli", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öz, B., 2012, "Kamu İnşaat Projelerinde Karşılaşılan İhtilaflar İçin Bir Bulanık Mantık Çözüm Modeli", Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sarıdemir, M., 2008, "Farklı Agregalarla Üretilmiş Beton Özelliklerinin Yapay Sinir Ağları ve Bulanık Mantık ile Tahmin Edilmesi", Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tümer, G., 2010, "Regresyon Modellerinde En Küçük Kareler Tahmin Edicileri", Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Uğur, L.O., 2007, "Yapı Maliyetinin Yapay Sinir Ağı ile Analizi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Uğur, L.O., Kanit, R., Erdal, H., Namli, E., Erdal, H.İ., Baykan, U.N., Erdal, M., (2019), "Enhanced Predictive Models for Construction Costs: A Case Study of Turkish Mass Housing Sector" *Computational Economics*, 53 (4), ss.3336-3344.
- Yılmaz, İ., 2012, "Osmanlı Dönemi Mimarlık Eserleri Restorasyon İnşaat Maliyetlerinin Yapay Zekâ Yöntemleri ile Tahmini", Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, M., Kanit, R., Erdal, M., Yıldız, S., Bakış, A., 2016, "Bina Bakım Onarım Ödeneklerinin Etkin Kullanımı Maksadıyla İhale Bedelini Etkileyen Faktörlerin Yapay Sinir Ağları ve Lineer Regresyon Yöntemleri ile Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 19 (4), ss. 461-470.
- Yolasiğmaz, İ.B., 2015, "Destek Vektör Regresyon Metodu Kullanarak İnşaat Projelerinin Kavramsal Maliyet Tahmini", Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ek 1. Bina tanımlayıcı özelliklerine ait veriler ile 2019 yılına ait gerçekleşen maliyet verileri

Sıra No	Cephe yüksekliği (m)	Bir kattaki daire sayısı (ad)	Toplam daire sayısı (ad)	Tip kat alanı (m ²)	Cephe alanı (m ²)	Cephe boşluk alanı (m ²)	Kat sayısı (ad)	Ortalama daire alanı (m ²)	MALİYET (TL)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₀
1	33,30	4,00	44,00	574,50	3373,00	1037,00	11,00	143,60	6076703,60
2	33,20	4,00	44,00	568,20	3216,00	1022,00	11,00	142,10	5955702,40
3	36,20	4,00	50,00	569,90	3137,00	1122,00	13,00	142,50	8190619,30
4	42,00	2,00	30,00	258,40	3087,00	543,00	15,00	129,20	3227715,20
5	42,30	2,00	30,00	267,30	3255,00	552,00	15,00	133,70	3615337,00
6	36,40	4,00	50,00	576,40	3283,00	1166,00	13,00	144,10	7903523,40
7	36,20	4,00	50,00	568,30	3166,00	1145,00	13,00	142,10	7067725,50
8	30,70	4,00	42,00	571,90	3123,00	995,00	11,00	143,00	6163289,30
9	30,60	4,00	42,00	560,00	2984,00	902,00	11,00	140,00	5368422,60
10	36,40	4,00	50,00	513,00	2836,00	921,00	11,00	128,30	6411927,50
11	36,20	4,00	50,00	492,00	2715,00	893,00	11,00	123,00	5641533,80
12	25,20	4,00	36,00	566,80	3112,00	1024,00	13,00	141,70	6515199,90
13	25,10	4,00	36,00	562,00	3088,00	1015,00	13,00	140,50	6223471,10
14	36,40	2,00	26,00	560,30	2876,00	811,00	13,00	280,10	5654464,50
15	36,20	2,00	26,00	558,70	2712,00	824,00	13,00	279,40	5458665,70
16	42,00	2,00	30,00	265,70	3028,00	550,00	15,00	132,90	5811499,60
17	42,00	2,00	30,00	263,80	2843,00	543,00	15,00	131,90	5141377,90
18	33,60	2,00	24,00	260,00	2928,00	488,00	12,00	130,00	4566967,90
19	33,50	2,00	24,00	258,00	2834,00	473,00	12,00	129,00	4198858,50
20	42,00	2,00	30,00	302,50	3096,00	561,00	15,00	151,20	4616767,40
21	42,00	2,00	30,00	298,00	3053,00	553,00	15,00	149,00	4313517,00
22	30,80	2,00	22,00	294,40	2889,00	512,00	11,00	147,20	4097571,20
23	30,60	2,00	22,00	287,70	2734,00	502,00	11,00	143,90	3789333,70
24	36,40	2,00	26,00	210,60	2541,00	388,00	13,00	105,30	2453148,10
25	36,20	2,00	26,00	209,50	2487,00	379,00	13,00	104,80	2424468,50
26	36,40	4,00	48,00	574,20	3287,00	514,00	12,00	143,50	5196396,20
27	36,60	4,00	48,00	579,00	3354,00	521,00	12,00	144,80	6103216,10
28	32,20	3,00	35,00	383,30	3399,00	691,00	12,00	127,80	3842857,70
29	32,20	3,00	35,00	377,00	3122,00	681,00	12,00	125,70	3479420,50
30	29,50	3,00	32,00	423,00	3227,00	621,00	11,00	141,00	7472025,30
31	36,40	3,00	39,00	396,50	3724,00	709,00	13,00	132,20	5430672,30
32	36,40	3,00	39,00	384,00	3645,00	702,00	13,00	128,00	4734630,90
33	33,60	3,00	36,00	412,40	3689,00	682,00	12,00	137,50	4600307,90

34	33,50	3,00	36,00	387,00	3417,00	645,00	12,00	129,00	3740205,20
35	25,85	4,00	36,00	463,10	2244,00	452,00	12,00	115,80	2337905,80
36	25,85	4,00	36,00	472,00	2341,00	456,00	12,00	118,00	2437884,80
37	32,98	4,00	48,00	600,60	3239,00	514,00	12,00	150,20	3771216,80
38	33,02	4,00	48,00	612,00	3314,00	518,00	12,00	153,00	4052095,90
39	16,62	2,00	18,00	348,00	1342,00	179,00	6,00	174,00	1318001,00
40	11,52	2,00	8,00	219,30	691,00	129,00	4,00	109,70	1279502,30
41	11,32	2,00	8,00	215,00	672,00	112,00	4,00	107,50	1235615,80
42	11,16	4,00	16,00	394,50	887,00	166,00	4,00	98,60	1058498,90
43	11,23	4,00	16,00	432,00	892,00	172,00	4,00	108,00	1126750,40
44	11,16	2,00	8,00	181,00	542,00	202,00	4,00	90,50	1139090,90
45	11,32	2,00	8,00	192,00	553,00	209,00	4,00	96,00	1299053,70
46	11,32	4,00	16,00	594,00	1123,00	183,00	4,00	148,50	1886085,00
47	11,16	4,00	16,00	503,00	1040,00	178,00	4,00	125,80	1456922,20
48	11,16	4,00	16,00	512,00	1052,00	181,00	4,00	128,00	1563501,20
49	16,74	4,00	24,00	548,00	1582,00	381,00	6,00	137,00	2170209,00
50	16,74	4,00	24,00	542,00	1521,00	362,00	6,00	135,50	2016514,20
51	11,16	2,00	8,00	316,50	754,00	122,00	4,00	158,30	895282,20
52	11,16	2,00	8,00	312,00	742,00	117,00	4,00	156,00	867025,50
53	36,57	4,00	52,00	546,10	3423,00	634,00	13,00	136,50	4824343,90
54	36,57	4,00	52,00	541,00	3341,00	621,00	13,00	135,30	4341248,20
55	11,16	2,00	8,00	328,40	817,00	132,00	4,00	164,20	945196,70
56	11,16	2,00	8,00	332,00	821,00	137,00	4,00	166,00	1308105,30
57	11,16	2,00	8,00	196,70	596,00	85,00	4,00	98,40	1113974,60
58	11,60	2,00	8,00	199,30	608,00	91,00	4,00	99,70	1223587,00
59	36,40	4,00	50,00	572,30	3296,00	1194,30	13,00	143,10	8255510,50
60	36,40	4,00	50,00	496,70	2788,00	912,60	11,00	124,20	5855706,40
61	16,74	2,00	18,00	337,80	1296,00	174,51	6,00	168,90	1214366,60
62	11,16	4,00	16,00	590,70	1098,00	178,37	4,00	147,70	1668236,80
63	16,74	4,00	24,00	546,10	1567,00	368,47	6,00	136,50	2085565,60

Ek 2. Maliyet tahmin değerleri

S.NU.	GERÇEK MALİYET	EKKYR ile tahmin	ÇKA 1GK ile tahmin	BUS ile tahmin (Centroid)
1	6076703,60	6621321,30	6151924,57	7620000,00
2	5955702,40	6452813,76	6050154,29	7230000,00
3	8190619,30	6618764,22	6375030,90	7460000,00
4	3227715,20	3961449,09	3925617,68	3550000,00
5	3615337,00	4095504,97	4116469,61	3460000,00
6	7903523,40	6927148,04	6488452,21	7850000,00
7	7067725,50	6736499,37	6414005,71	7460000,00
8	6163289,30	6112883,75	5851937,38	6910000,00
9	5368422,60	5571953,46	5555137,65	6350000,00
10	6411927,50	5839305,80	5843768,00	6340000,00
11	5641533,80	5581999,68	5682856,52	6040000,00
12	6515199,90	5425005,38	5558345,50	7120000,00
13	6223471,10	5350892,83	5512354,20	7010000,00
14	5654464,50	4813988,97	5160524,43	5440000,00
15	5458665,70	4783454,34	5078302,46	5440000,00
16	5811499,60	3958340,15	3927334,09	3480000,00
17	5141377,90	3843130,27	3763072,10	3540000,00
18	4566967,90	3666413,30	3126926,13	3910000,00
19	4198858,50	3546315,54	3015436,90	3910000,00
20	4616767,40	4001353,31	4132320,13	3910000,00
21	4313517,00	3948198,30	4061367,41	3820000,00
22	4097571,20	3735875,81	3102195,34	3780000,00
23	3789333,70	3607503,72	2948618,11	3890000,00
24	2453148,10	3059545,62	2649637,58	3910000,00
25	2424468,50	2976006,16	2591137,39	3910000,00
26	5196396,20	4096746,68	5187719,50	4280000,00
27	6103216,10	4188110,88	5263467,15	4230000,00
28	3842857,70	4613182,81	4736666,48	4050000,00
29	3479420,50	4430289,72	4493041,22	3900000,00
30	7472025,30	4293417,61	4290708,54	4930000,00
31	5430672,30	4939331,32	5319781,08	4420000,00
32	4734630,90	4853929,57	5223906,06	4250000,00
33	4600307,90	4845004,29	5068099,73	4560000,00
34	3740205,20	4503891,18	4711373,07	4280000,00
35	2337905,80	2335431,38	3143605,23	2380000,00
36	2437884,80	2421977,81	3238809,80	2360000,00

S.NU.	GERÇEK MALİYET	EKKYR ile tahmin	ÇKA 1GK ile tahmin	BUS ile tahmin (Centroid)
37	3771216,80	3853871,57	5120136,32	4050000,00
38	4052095,90	3940398,84	5203641,49	4110000,00
39	1318001,00	1353834,61	1558643,37	1520000,00
40	1279502,30	1121337,17	1219801,90	1350000,00
41	1235615,80	1021252,89	1210025,13	1350000,00
42	1058498,90	999133,01	1374308,19	1400000,00
43	1126750,40	1130890,21	1399178,33	1360000,00
44	1139090,90	1410989,77	1214538,60	1400000,00
45	1299053,70	1450036,87	1223053,80	1390000,00
46	1886085,00	1709797,95	1554902,11	1540000,00
47	1456922,20	1401763,63	1470020,73	1700000,00
48	1563501,20	1445126,40	1480220,33	1720000,00
49	2170209,00	2636254,91	2132349,88	2260000,00
50	2016514,20	2503282,49	2067094,75	2230000,00
51	895282,20	977204,44	1265647,04	1370000,00
52	867025,50	953928,17	1260164,54	1380000,00
53	4824343,90	4389736,30	5655578,17	4820000,00
54	4341248,20	4276596,65	5572543,33	4900000,00
55	945196,70	1040622,29	1282696,46	1420000,00
56	1308105,30	1061973,53	1287241,90	1430000,00
57	1113974,60	865501,31	1188196,22	1380000,00
58	1223587,00	933260,74	1193228,31	1370000,00
59	8255510,50	7055777,07	6522502,33	7900000,00
60	5855706,40	5736400,74	5775197,93	6160000,00
61	1214366,60	1333095,49	1535694,66	1470000,00
62	1668236,80	1654265,55	1541965,68	1630000,00
63	2085565,60	2565780,08	2102197,44	2230.000,00