

Deus Albert Msumange
Ersin Yener Yazıcı
Oktay Celep
Hacı Devenci

Orijinal Araştırma / Original Research

Investigation of the Amenability of a Copper-Rich Refractory Gold Ore to Cyanide Leaching

Bakır İçeriği Yüksek Refrakter Bir Altın Cevherinin Siyanür Liçine Uygunluğunun Araştırılması

Ramazan Kıрма
Musa Sarıkaya
Soner Top
Şükrü Uçkun
İrfan Timür

Orijinal Araştırma / Original Research

Gazlaştırma Tesisi Odun Atığı ve Sivas Kangal Linyit Kömürünün Boya Adsorpsiyonunda Kullanım Olanaklarının Araştırılması

Investigation on Usage Possibilities of Gasification Plant Wood Waste and Sivas Kangal Lignite Coal in Dye Adsorption

Ali Can Özdemir

Orijinal Araştırma / Original Research

Usability of Control Charts to Monitor Variation of Quality Parameters in Coal-Fired Thermal Power Plants

Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Kalite Parametrelerinin Değişiminin İzlenmesi için Kontrol Grafiklerinin Kullanılabilirliği

Fatih Bayram
İlker Bektaşoğlu

Orijinal Araştırma / Original Research

Bazı Kayaç Özelliklerinden Farklı Derinliklerdeki Kaya Tuzu Örneklerinin Elastisite Modülünün Tahmini

Predicting the Modulus of Elasticity of Rock Salt Samples at Different Depths from Some Rock Properties

Abdulkadir Karadoğan
Meriç Can Özyurt
Ülkü Kalaycı Şahinoğlu
Ümit Özer

Orijinal Araştırma / Original Research

Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini

Prediction of Blast Induced Ground Vibrations by Using Artificial Neural Networks

Ömür Acaroğlu
Selma Ünlü
Burcu Hasipek

Teknik Not / Technical Note

Üç Konili Rotari Matkapların Seçiminde Dikkat Edilecek Önemli Parametreler

Crucial Parameters to be Considered for Selection of Rotary Tricone Bits

Bilimsel Madencilik Dergisi'ne Makale Gönderilmesi, Yazım Kuralları ve Yayına Kabul İlkeleri
Guide for Authors and Publication Rules

2020 Yılı Hakem Listesi

List of Reviewers in 2020



BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ
Scientific Mining Journal

Cilt / Vol: 59, Sayı / No: 4, Aralık / December, 2020

TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın hakemli dergisidir.
A peer-reviewed quarterly journal of the Chamber of Mining Engineers of Turkey

Baş Editor / Editor-in-Chief

Dr. Nejat Tamzok, Türkiye Kömür İşletmeleri / *Turkish Coal Enterprises*

Editörler / Editors

Dr. Bülent Toka, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü / *General Directorate of Mineral Research and Exploration*

Dr. İlkay Bengü Can, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

Dr. Ümit Özer, İstanbul Üniversitesi / *İstanbul University - Cerrahpaşa*

Dr. Mehtap Gülsün Kılıç, Nadir Toprak Elementleri Araştırma Enstitüsü / *Rare Earth Elements Research Institute*

Editör Yardımcıları / Editor Assistants

Dr. Emre Yılmazkaya, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

Dr. Ece Kundak, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi / *Eskişehir Osmangazi University*

Ercan Polat, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi / *Muğla Sıtkı Koçman University*

AMAÇ VE KAPSAM

Bilimsel Madencilik Dergisi TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın açık erişimli elektronik ortamda ve basılı olarak yayımlanan süreli bilimsel yayınıdır. Dergi 1960 yılından itibaren yayımlanmaktadır. Derginin ismi 2016 yılı Haziran sayısına kadar "Madencilik" şeklindeyken, benzer isimli popüler dergilerle karıştırılabilmesi nedeniyle 2016 yılı Eylül sayısından itibaren "Bilimsel Madencilik Dergisi" olarak değiştirilmiş ve o tarihe kadar 0024-9416 olan ISSN numarası da 2564-7024 olarak güncellenmiştir.

Yılda 4 kez (Mart-Haziran-Eylül-Aralık) yayımlanan Bilimsel Madencilik Dergisi (ISSN: 2564-7024), maden mühendisliği ve mineral endüstrisi alanında ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan, bilimsel normlara ve yayın etiğine uygun, özgün bilimsel çalışmaları bilim insanlarına, maden mühendislerine ve kamuoyuna duyurmayı ve bu yolla bilimsel bilgiyi toplumla paylaşmayı amaçlamaktadır. Derginin yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir.

Dergi, maden mühendisliği alanında özgün bir araştırmayı bulgu ve sonuçları ile yansıtan kuramsal, deneysel ve uygulamalı araştırma makalelerine; yeterli sayıda bilimsel makaleyi tarayıp konuyu bugünkü bilgi ve teknoloji düzeyinde özetleyen, değerlendirme yapan ve bu bulguları karşılaştırarak yorumlayan tarama makalelerine; özgün bir yöntem veya tekniği tarif eden kısa makale olarak tanımlanabilecek teknik notlara; ve gerçek ya da kuramsal bir mesleki uygulamayı temel alan, sistematik veri toplama ve veri analizi içeren vaka çalışmalarına yer vermektedir.

Dergide, yenilenemeyen maden kaynakların sürdürülebilir madencilik ilkeleri doğrultusunda insanlığın hizmetine sunulması için gereken mevcut bilginin geliştirilmesini sağlayacak konularda eserlere öncelik verilmektedir. Bu kapsamda; maden arama, maden yatağı modelleme, topoğrafya, maden ekonomisi, jeostatistik, kaya mekaniği ve jeoteknik, kazılabilirlik etüdü, yer altı ve açık maden işletme, maden tasarımı, madenlerde ve tünellerde tahkimat sistemleri, delme-patlatma tasarımı, madenlerde üretim planlaması ve optimizasyon, madenlerde iş sağlığı ve güvenliği yönetimi, maden havalandırma, yeraltı kömür madenlerinde metan gazı emisyonu ve metan drenajı, cevher hazırlama ve zenginleştirme, proses mineralojisi, analitik teknikler, öğütme, sınıflandırma ve ayırma, flotasyon/flokülasyon, katı/sıvı ayırımı, fiziksel zenginleştirme yöntemleri, hidro ve biyometalurji, üretim metalurjisi, modelleme ve simülasyon, enstrümantasyon ve proses kontrol, geri dönüşüm ve atıkların işlenmesi, maden hukuku, madenlerde çevre sağlığı ve yönetimi, madenlerde nakliyat, makina ve ekipman seçimi ve planlaması, kömür gazlaştırma, mermer teknolojisini, endüstriyel hammaddeler, uzay madenciliği, denizaltı madenciliği ve mekanizasyon ile ilgili konular dergi içeriğinde yer almaktadır.

Gönderilen yazılar editörler kurulu ve konusunda uzman hakemler tarafından bağımsız ve akademik yayıncılıkta en iyi uygulamalarla uyumlu şekilde değerlendirilmekte olup, değerlendirme süreci sonunda yayınlanması uygun görülen yazıların yayın hakları yazarlar tarafından telif sözleşmesi ile TMMOB Maden Mühendisleri Odası'na devredilir.

AIMS AND SCOPE

Scientific Mining Journal, which is published in open access electronic environment and in printed, is a periodical scientific journal of Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects Chamber of Mining Engineers. The name of the journal was "Mining" until June 2016 and it has been changed to "Scientific Mining Journal" since September 2016 because it can be confused with popular journals with similar names and the ISSN number has been updated from 0024-9416 to 2564-7024.

Scientific Mining Journal, published four times a year (March-June-September-December), aims to disseminate original scientific studies which are conducted according to the scientific norms and publication ethics at national and international scale, to scientists, mining engineers, the public; and thus to share scientific knowledge with society. The journal is in both Turkish and English.

The journal covers theoretical, experimental, and applied research articles, which reflects the findings and results of an original research in the field of mining engineering; review articles, which assess, evaluates, and interprets the findings of a comprehensive review of sufficient number of scientific articles and summarize them at present information and technology level; technical notes, which may be defined as a short article that describes a novel methodology or technique; a case studies, which are based on the theoretical or real professional practice and involves systematic data collection and analysis.

The journal gives priority to works that will enable the advancement of current available information necessary to serve humanity with nonrenewable mineral resources with the perspective of sustainable mining principles. In this context, mine exploration, mineral resource modeling, surveying, mine economics and feasibility, geostatistics, rock mechanics and geotechnics, diggability studies, underground and surface mining, mine design, support design in underground mines and tunnels, rock penetration and rock fragmentation, mine production planning and pit optimization, mine health and safety management, mine ventilation, methane emission and drainage in underground coal mines, mineral processing and beneficiation, process mineralogy, analytical techniques, mineral comminution, mineral classification and separation, flotation/flocculation, solid/liquid separation, physical enrichment methods, hydro and biometallurgy, production metallurgy, modeling and simulation, instrumentation and process control, recycling and waste processing, mining law, environmental health and management, transportation, machinery and equipment selection and planning, coal gasification, marble technology, industrial minerals, space mining, submarine mining and mechanization are included in the journal content.

Submitted manuscripts are evaluated by the editorial board and expert referees independently in accordance with the best practices in academic publishing. The publishing rights of the manuscripts, approved for publication at the end of the evaluation process, are transferred to the Chamber of Mining Engineers by the authors.

BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ

Scientific Mining Journal

Bilimsel MADENCİLİK Dergisi makale dizin ve özlerinin yer aldığı veri tabanları:

Scientific MINING Journal is indexed or abstracted in:

SCOPUS

Google Scholar

ULAKBİM TR Dizin

GeoRef

OpenAIRE

Makale Yazım Kuralları, Yayın Danışma Kurulu, Hakem Değerlendirme Süreci ve Hakem Listelerine <http://www.madencilik.org.tr> adresinden erişilebilir.

Author Instructions, Editorial Advisory Board, the Peer Review Process and Reviewer Lists can be accessed from <http://www.mining.org.tr>

Etik Kurallar / Publication Ethics

Dergiye gönderilecek çalışmalarda, araştırma ve yayın etiğine uyulması tartışmasız bir ön koşul olarak kabul edilmektedir. Yayın Etik Kurallarına <http://www.madencilik.org.tr> adresinden erişilebilir.

Complying with the research and publication ethics is considered an indisputable precondition to be published. Publication Ethics can be accessed from <http://www.mining.org.tr>

BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ
Scientific Mining Journal

TMMOB Maden Mühendisleri Odası adına sahibi /
Owner on behalf of the Chamber of Mining Engineers of Turkey: Ayhan Yüksel

Sorumlu yazı işleri müdürü / *Responsible editing manager: Mehmet Erşat Akyazılı*

Yönetim yeri ve yazışma adresi / *Correspondence address:*
Selanik Cad. No: 19/4 06650 Kızılay-Çankaya / ANKARA TURKEY

Tel: +90 312 425 10 80 / +90 312 418 36 57 • Fax: +90 312 417 52 90

e-mail: bilgi@madencilik.org.tr / info@mining.org.tr
web: <http://www.madencilik.org.tr> / <http://www.mining.org.tr>

Yayın türü / *Publication type: Yerel süreli yayın, 3 ayda bir yayımlanır / Local periodical, quarterly*

Tasarım / *Design: Gülendem Gültekin*

Baskı yeri / *Printed at: Ziraat Gurup Matbaacılık Ambalaj San. ve Tic. A.Ş.*

Baskı tarihi ve saati / *Printing date: 01.12.2020 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*

BİLİMSEL
madencilik
SCIENTIFIC MINING JOURNAL
DERGİSİ

TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını / The Publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey

ARALIK
DECEMBER
2020

ÇİLT
VOLUME
59

SAYI
NUMBER
4

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Deus Albert Msumange
Ersin Yener Yazıcı
Oktay Celep
Hacı Deveci
- 225
- Orijinal Araştırma / *Original Research*
Investigation of the Amenability of a Copper-Rich Refractory Gold Ore to Cyanide Leaching
Bakır İçeriği Yüksek Refrakter Bir Altın Cevherinin Siyanür Liçine Uygunluğunun Araştırılması
- Ramazan Kıрма
Musa Sarıkaya
Soner Top
Şükrü Uçkun
İrfan Timür
- 235
- Orijinal Araştırma / *Original Research*
Gazlaştırma Tesisi Odun Atığı ve Sivas Kangal Linyit Kömürünün Boya Adsorpsiyonunda Kullanım Olanaklarının Araştırılması
Investigation on Usage Possibilities of Gasification Plant Wood Waste and Sivas Kangal Lignite Coal in Dye Adsorption
- Ali Can Özdemir
- 247
- Orijinal Araştırma / *Original Research*
Usability of Control Charts to Monitor Variation of Quality Parameters in Coal-Fired Thermal Power Plants
Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Kalite Parametrelerinin Değişiminin İzlenmesi için Kontrol Grafiklerinin Kullanılabilirliği
- Fatih Bayram
İlker Bektaşoğlu
- 255
- Orijinal Araştırma / *Original Research*
Bazı Kayaç Özelliklerinden Farklı Derinliklerdeki Kaya Tuzu Örneklerinin Elastisite Modülünün Tahmini
Predicting the Modulus of Elasticity of Rock Salt Samples at Different Depths from Some Rock Properties
- Abdulkadir Karadoğan
Meriç Can Özyurt
Ülkü Kalaycı Şahinoğlu
Ümit Özer
- 265
- Orijinal Araştırma / *Original Research*
Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Tahmini
Prediction of Blast Induced Ground Vibrations by Using Artificial Neural Networks
- Ömür Acaroğlu
Selma Ünlü
Burcu Hasipek
- 275
- Teknik Not / *Technical Note*
Üç Konili Rotari Matkapların Seçiminde Dikkat Edilecek Önemli Parametreler
Crucial Parameters to be Considered for Selection of Rotary Tricone Bits
- 287
- Bilimsel Madencilik Dergisi'ne Makale Gönderilmesi, Yazım Kuralları ve Yayına Kabul İlkeleri**
Guide for Authors and Publication Rules
- 295
- 2020 Yılı Hakem Listesi**
List of Reviewers in 2020





Orijinal Araştırma / Original Research

INVESTIGATION OF THE AMENABILITY OF A COPPER-RICH REFRACTORY GOLD ORE TO CYANIDE LEACHING

BAKIR İÇERİĞİ YÜKSEK REFRAKTER BİR ALTIN CEVHERİNİN SİYANÜR LİÇİNE UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Deus Albert Msumange^{a,*}, Ersin Yener Yazıcı^{a,**}, Oktay Celep^{a,***}, Hacı Deveci^{a,****}

^a Hydromet B&PM Research Group, Division of Mineral&Coal Processing, Department of Mining Engineering, Karadeniz Technical University (KTU), 61080, Trabzon, TURKEY.

Geliş Tarihi / Received : 15 Mayıs / May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 15 Ağustos / August 2020

Keywords:

Gold,
Copper-gold ores,
Cyanide leaching,
Acid pretreatment,
Ultra-fine grinding,
Refractory gold ore.

ABSTRACT

The production of gold from refractory gold ores has been increasing due to the exhaustion of free milling gold ores. The presence of cyanicides (e.g., copper minerals) and encapsulation of gold in minerals such as pyrite and arsenopyrite are common reasons for refractoriness of gold ores. In this study, the amenability of a copper-rich gold ore (108 g/t Au, 1.60% Cu) to cyanide leaching was investigated. Direct cyanide leaching of the ore showed that the gold extraction was very low by 18.4% over 24 h., indicating that the ore is highly refractory. Sulphuric acid pretreatment for the removal of acid-soluble copper was found to be not effective to achieve high gold extractions at the subsequent cyanide leaching. Leaching at high NaCN concentrations (1-8 g/L) yielded limited Au extractions of $\leq 47.2\%$. Ultra-fine grinding (UFG) (d_{80} : 8-73 μm) as a pretreatment route followed by cyanide leaching also could provide Au recoveries of just below 54.1%. The findings showed that the ore is double-refractory and needs the employment of more effective pretreatment process(es) to achieve acceptable gold extractions ($>90\%$) in subsequent cyanidation stage.

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Altın,
Bakırlı altın cevherleri,
Siyanür liçi,
Asit ön işlemi,
Çok ince öğütme,
Refrakter altın cevheri.

Serbest altın içeren cevherlerin giderek tükenmesi nedeniyle refrakter altın cevherlerinden altın üretimi artmaktadır. Siyanür tüketen minerallerin (bakır mineralleri gibi) varlığı ve altının pirit ve arsenopirit gibi mineraller içerisinde kapanım halinde bulunması altın cevherlerindeki refrakterliğin yaygın nedenleri arasında yer almaktadır. Bu çalışmada, bakırca zengin bir altın cevherinin (108 g/t Au, %1,60 Cu) siyanür liçine uygunluğu araştırılmıştır. Siyanür liçinde elde edilen düşük (%18,4) altın kazanımı, cevherin yüksek derecede refrakter bir cevher olduğunu göstermektedir. Sülfürik asit ön işlemi ile asitte çözünen bakırın uzaklaştırılması, takip eden siyanür liçinde yüksek altın kazanımlarına ulaşılmasında etkili olmamıştır. Yüksek NaCN konsantrasyonlarında (1-8 g/L) yapılan testlerde, sınırı altın kazanımları ($\leq 47,2$) elde edilmiştir. Siyanür liçinden önce ön işlem olarak uygulanan çok ince öğütme (d_{80} : 8-73 μm) sonrası altın kazanımları %54,1'in altında kalmıştır. Elde edilen sonuçlar cevherin çift yönlü refrakter bir cevher olduğunu ve siyanür liçi aşamasında kabul edilebilir (>90) altın kazanımlarına ulaşmak için daha etkili ön işlem(ler)in uygulanmasının gerekli olduğunu göstermiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: msudeak8@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-0809-7228>

** eyazici@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8711-0784>

*** ocelep@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-9024-4196>

**** hdeveci@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4105-0912>

INTRODUCTION

Following the rapid diminution of free milling gold ores, the production of gold from refractory ores has been receiving more attention across the globe. Ores are described as refractory when they are not essentially amenable to direct cyanidation i.e., low gold recoveries (<80%) under typical cyanide leaching conditions (Celep, 2015; Marsden and House, 2006). Several factors have been discussed broadly as the cause of refractoriness. Carbonaceous matter (i.e. inorganic and/or organic carbon) present in the ore is one of a common cause of low gold recovery because it easily adsorbs gold in solution and leads to “preg-robbing” phenomenon. Encapsulation of gold in sulphide (commonly pyrite and arsenopyrite) and/or non-sulphide gangue minerals appears to be the most prevalent factor of refractoriness (Habashi, 1999; Marsden and House, 2006). The existence of excessive cyanide- and oxygen-consuming phases (e.g., reactive copper minerals, pyrrhotite) may also severely interfere with the cyanide leaching of gold. Moreover, gold ores

in which gold occur as alloys electrum, AuTe₂, AuSb₂ etc. can exhibit refractory behaviour due to the remarkably slow (or even no) dissolution of such gold alloys in cyanide solutions (Celep, 2015; Chryssoulis and McMullen, 2016).

In recent years, copper-rich gold ores have attracted particular interest and hence the production of gold from copper-rich gold ores has been increasing (Sceresini and Breuer, 2016). As of 2009, above 20% of the total world’s Au production was from Cu-Au ores (Fleming et al., 2011). Porphyry copper deposits are essentially one of the basic types of the mineral body containing gold. The typical gold and copper grades in these deposits are 0.2-2 g/t and 0.2-1%, respectively (Kesler et al., 2002; Sinclair, 2007). Turkey is also one of the countries having both free milling and refractory gold/silver ores including those ores with high copper content. Table 1 summarizes some important gold/silver ore deposits with their metal (Au, Ag, Cu) grades and employed processing routes in Turkey.

Gold recovery from gold-copper ores presents various technical drawbacks ascribed to the

Table 1. Some gold/silver ore deposits with metal grades and applied processing routes in Turkey

| Location | Au grade (g/t) | Ag grade (g/t) | Cu Content | Processing Method | Ore Type |
|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-------------------|----------|
| Bergama/Ovacık(İzmir) | 9 ^a | 11 ^a | - | ATL | FM |
| Küçükdere (Balıkesir) | 5 ^a | 11.8 ^a | - | ATL | FM |
| Kaymaz (Eskişehir) | 7.9 ^a | 6.4 ^a | - | ATL | FM |
| Kışladağ (Uşak) | 1.2 ^a | 0.9 ^a | - | HL | FM |
| Mastra (Gümüşhane) | 12.13 ^{b,c} | 5.5 ^{b,c} | <1.1% ^b | ATL | FM&R |
| Çöpler (Erzincan) (Oxide ore) | 1.4 ^d | - | 0.03% (Some zones ≤3.9%) ^d | HL | FM |
| Çöpler (Erzincan) (Sulphide ore) | 2.60 ^e | 6.70 ^e | - | POX | R |
| Efemçukuru (İzmir) | 13.3 ^f 62 ^g | 110 ^f | 0.35%Cu ^g | F + HL | R |
| Gümüşhane village (Artvin) | 0.3 ^h | - | 0.3% ^h | Under development | R |
| Cerattepe (Artvin) | 4.2 ^f | 151 ^f | 5.2% ^f | - | R |
| Hot Maden (Artvin) | 10 ⁱ | - | 2.2% ⁱ | - | R |
| Gümüşköy (Kütahya) | - | 127 ^a | - | ATL | R |

ATL: Agitation tank leaching; HL: Heap leaching; F: Flotation; POX: Pressure oxidation; FM: Free milling; R: Refractory

^a Celep (2011); ^b Bas et al., (2012); ^c URL-1 (2013); ^d Bascombe et al., (2013); ^e URL-2 (2020); ^f Yigit (2006); ^g Ahlatcı et al., (2016); ^h Akçay and Gündüz (2004); ⁱ URL-3 (2016)

ready dissolution of most minerals of copper in cyanide solutions (Table 2) leading to high cyanide consumption and exorbitant reagent costs. When subjected to cyanide-deficient solutions, certain copper minerals (e.g., chalcopyrite) can also exhibit preg-borrowing peculiarities, which are reversible (Marsden and House, 2006). High cyanide consumption through the formation of stable copper cyanide complexes (Equations 1-5) may even render the process uneconomic.

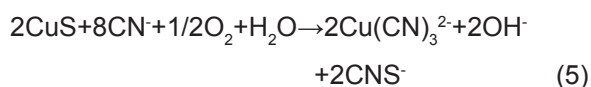
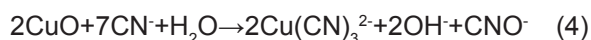
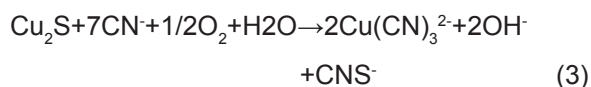
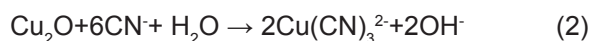


Table 2. The solubility of copper minerals in 0.1% NaCN solutions (Marsden and House, 2006; Hedley and Tabachnick, 1958)

| Mineral | Formula | %Cu dissolved (23°C) | %Cu dissolved (45°C) |
|---------------|---|----------------------|----------------------|
| Azurite | $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ | 94.5 | 100.0 |
| Malachite | $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ | 90.2 | 100.0 |
| Chalcocite | Cu_2S | 90.2 | 100.0 |
| Covellite | CuS | - | - |
| Native Copper | Cu | 90 | 100.0 |
| Cuprite | Cu_2O | 85.5 | 100.0 |
| Bornite | Cu_5FeS_4 | 70 | 100.0 |
| Chalcopyrite | CuFeS_2 | 5.6 | 8.2 |
| Tetrahedrite | $(\text{Cu,Fe,Ag,Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ | 21.9 | 43.7 |

In cyanide leaching of free-milling gold ores, typical cyanide consumption is 0.25-2 kg/t NaCN (Marsden and House, 2006). However, gold ores containing >0.5% Cu cannot be processed in an economic way on the grounds that every 1% reactive copper consumes 30 kg/t NaCN (Muir, 2011). If the ore contains copper sulphides, cyanide consumption could further increase up to 51.5 kg/t for each per cent of reactive copper (Sceresini and Breuer, 2016). Intensive cyanide leaching by maintaining a CN:Cu ratio of >4 can be used to achieve acceptable gold extractions (Fleming, 2011; Bas et al., 2015; Deveci et al., 2018). Pretreatment and/or alternative methods are indispensable before leaching by cyanidation of refractory gold ores to enhance gold recoveries. Potential options for the treatment of copper-rich gold ores, in particular, include the removal of copper sulphides by flotation followed by cyanide leaching, the elimination of copper in acid/alkaline solutions prior to cyanide leaching, the use of alternative

lixiviant systems (e.g., thiosulphate leaching, ammoniacal cyanide leaching) (Ahlataci et al., 2018; Bas et al., 2015; Yazici et al., 2015) and intensive cyanide leaching (i.e., leaching at high cyanide concentrations) followed by cyanide recovery (e.g, SART process) (Yilmaz et al., 2019; Sceresini and Breuer, 2016). Depending on the cause(s) of the refractoriness, other pretreatment options such as ultrafine grinding, pressure oxidation, roasting and biooxidation can be used prior to cyanide leaching (Celep, 2015).

In this study, the amenability of a copper-rich refractory gold ore to cyanide leaching was investigated. The effect of H_2SO_4 pretreatment for reactive copper removal on the gold extraction in the subsequent cyanide leaching was examined. Effect of cyanide concentration in the range of 1-8 g/L NaCN was also tested on the cyanide leaching of gold. Ultra-fine grinding (UFG) as a pretreatment method prior to cyanidation of the ore was also investigated.

1. EXPERIMENTAL

1.1. Ore Sample

The ore sample utilised in this work was from copper-rich zones of Mastra-Gümüşhane deposit. The crushed ore (-4 mm) was ground to 73 µm (d_{80}) by using a laboratory rod mill over 30 min. The ground ore was riffled and then divided by rotary cone sample divider (Fritsch Laborette 27) to obtain representative sub-samples for characterization and leaching tests. Table 3 shows the chemical analysis of the ore sample. XRF and ICP-MS were used for the analysis of whole-rock and trace elements, respectively, in an accredited analytical laboratory (Argetest, Turkey). An atomic absorption spectrometer (AAS; Perkin Elmer AAnalyst 400) was also used for the analysis of Au, Ag, and Cu from leach solutions or aliquots obtained from hot digestion of the ore sample or leaching residue within aqua regia. The analytical results have shown that the sample is rich in gold and copper, containing 108 g/t and 1.6%, respectively. According to the data collected from XRD and ICP-MS, the main phases of the ore were identified to be quartz ($67.3\% \text{ SiO}_2$) and pyrite (FeS_2) (Figure 1). Bas et al. (2012) reported that samples from a different zone in the same field contained chalcopyrite (CuFeS_2), covellite (CuS), chalcocite (Cu_2S), pyrite (FeS_2) and sphalerite (ZnS).

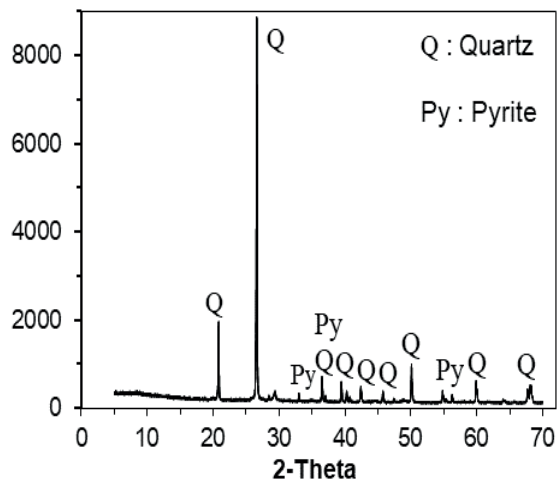


Figure 1. XRD profile of the ore sample

Table 3. Chemical composition of the ore sample

| Element/Compound | Content (%) | Element | Content (g/t) |
|-------------------------|-------------|---------|---------------|
| SiO_2 | 67.3 | Au | 107.7 |
| Al_2O_3 | 11.51 | Cu | 15960 |
| Fe_2O_3 | 6.06 | Al | 3900 |
| MgO | 0.45 | Ni | 604.5 |
| CaO | 0.46 | Zn | 926.1 |
| Na_2O | 0.06 | Pb | 838.1 |
| K_2O | 2.58 | As | 225 |
| TiO_2 | 0.02 | Ba | 1211 |
| P_2O_5 | 0.19 | Ag | 9.3 |
| MnO | 0.18 | Sb | 93.21 |
| Cr_2O_3 | 0.015 | Mo | 24.64 |
| Fe | 4.02 | Cd | 10.7 |
| S | 3.46 | La | 1.64 |
| K | 0.21 | Na | 270 |
| Ca | 0.22 | Mg | 710 |
| P | 0.001> | Ti | 23 |
| LOI | 6.03 | Ga | 5> |
| Total C | 0.15 | Bi | 5> |
| Total S | 4.56 | Hg | 5> |
| Sum | 95.31 | Be | 1> |

1.2. Cyanide Leaching Tests with/without Acid Pretreatment

Cyanide leaching tests were conducted in 1000-mL Pyrex beakers for 24 h at room temperature. Mechanical stirrers equipped with PTFE coated four-blade 45°-pitched blade stainless steel impellers were used to agitate ore slurry. The diameter of these blade impellers was 6.4 cm. Figure 2 shows the experimental set-up used in cyanide leaching.

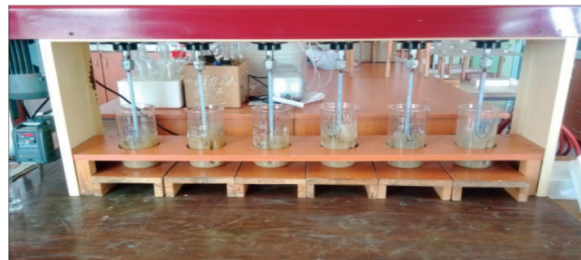


Figure 2. Multi mechanical stirrer set-up used in leaching tests

NaCN ($\geq 95\%$, Merck) was used to prepare leach solutions at required concentrations. Stirring speed employed in reactors was 650 rpm. A solids ratio of 25% w/w (120 g ore + 360 mL solution) was maintained in the tests. Air was delivered by an air pump, into the leaching medium at a flow rate of 1.5 L/min. pH was adjusted to 10.5-11 at which it was controlled over the leaching period by the use of lime. Samples (6 mL) were taken at certain intervals (30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h and 24 h) and passed to a centrifuge to get clear solutions for the analysis of copper, gold, and silver by AAS. The titratable cyanide (essentially free cyanide as well as cyanide dissociated from metal (e.g. Zn and Cu) cyanides) concentration was analysed by silver nitrate (0.02 M AgNO_3) titration using *p*-dimethyl amino-benzyl-rhodanine as the indicator to determine cyanide consumption as well as to maintain the NaCN concentration at the initial level. A NaCN stock solution (50 g/L) was used to keep the concentration of cyanide at the initial level over the leaching period. Following a leaching period of 24 h, filtration was done for separation of leach residues. After drying in an oven at 105 °C leaching residues were digested in a hot aqua regia for the analysis of metals. The extraction of metals was calculated based on the residual metal content. The relative standard deviation (RSD) of the metal recovery data was calculated based on replicate tests. The RSD for tests was found to be in the range of ± 0.6 -1%.

Acid pretreatment prior to cyanide leaching was also carried out to remove soluble copper using the same experimental set-up (Figure 2). Acid pretreatment was performed for 2 h in 1 M H_2SO_4 solution prepared using concentrated acid (96% H_2SO_4) at room temperature. In these tests, pH was controlled at < 2 . The solids ratio and stirring speed were fixed at 25 w/w and 650 rpm, respectively. On the termination of the acid leaching test, the residue was thoroughly washed and separated by filtration, dried and then subjected to cyanide leaching under the conditions explained above.

1.3. Ultra-fine Grinding (UFG) Pretreatment Prior to Cyanidation

A laboratory-scale pin-type vertical stirred media mill was used to produce ultra-finely ground samples (Figure 3). UFG of the ore sample was

done using 2 mm ceramic balls (alumina-based zirconia toughened, DMM AZ 2000[®]) at 29% w/v (S/L) ratio and 650 rpm stirring rate. The beads had Al_2O_3 content of 80%, specific gravity (SG) of 3.75-3.80 and Vickers hardness (HV) of 1314 N/mm². The grinding time was 15, 30 and 45 minutes which correspond to particle sizes (d_{80}) of 23 μm , 15 μm and 8 μm , respectively. Cyanide leaching tests were then carried out for the as-received ore and the ground samples for a period of 24 h.



Figure 3. The stirred mill used in the ultra-fine grinding (UFG)

2. RESULTS AND DISCUSSION

2.1. Cyanide Leaching with/without Acid Pretreatment

Cyanide leaching of the ore with/without acid pretreatment was performed (Figure 4). Direct cyanide leaching of the ore at 1.5 g/L NaCN without any pretreatment resulted in very limited gold extraction of 18.4% at 24 h (Figure 4a). This confirms that the ore is highly refractory. The total cyanide consumed in the leaching test was around 6.75 kg/t. This relatively high cyanide consumption suggested that copper and other cyanide consuming elements often exert a deleterious effect on the extraction of gold and reagent consumption. Previous studies have also reported low gold extractions in direct cyanide leaching of copper-gold ores. Bas et al. (2012)

reported that the direct cyanidation of a copper-rich gold ore (56 g/t Au, 1.1% Cu) which has the same origin yielded poor recoveries (<12%) of gold under the same cyanide leaching conditions. It was pointed out (Aylmore and Muir, 2001; Bas et al., 2012; Celep et al., 2018) that dissolution of copper minerals may adversely affect cyanidation leading to considerably high consumption of cyanide and markedly low recovery of gold.

Acid pretreatment (1 M H₂SO₄, 2 h) prior to cyanide leaching was also tested to eliminate copper interference through the dissolution of acid-soluble copper minerals in order to improve gold extraction in the subsequent cyanidation (Figure 4). It was found that in the acid pretreatment stage, 17.8% of copper was removed as well as 0.8% Ag, 4.0% Fe and 10.4% Zn was dissolved over 2 h. Compared with direct cyanide leaching this acid pretreatment appeared to lead to a 6.8% improvement in Au recovery in the subsequent cyanide leaching (Figure 4a). Silver extraction in the cyanide leaching was also observed to increase by 2.2-fold after acid pretreatment (Figure 4b). This could be also attributed to the effect of acid pretreatment allowing the exposure of silver minerals/phases associated with acid-soluble phases. Acid pretreatment remarkably reduced the cyanide consumption by 70.4% (i.e., from 6.75 kg/t to 2.0 kg/t) in cyanide leaching. These findings (Figure 4a) also showed that acid pretreatment failed to improve the gold extraction to the desired extent i.e., gold recovery in cyanide leaching was limited to 25.2% after acid pretreatment. Yazici et al. (2015) investigated the effect of acid pretreatment (H₂SO₄ with/without H₂O₂) on the extraction of gold in cyanide leaching of a copper-rich gold ore (56 g/t Au, 1.1% Cu). Direct cyanide leaching was reported to extract only 6.7% Au under typical cyanide leaching conditions (1.5 g/L NaCN, 24 h). These researchers found that in the sulphuric acid pretreatment (1 M H₂SO₄, 25 w/w solids ratio) the copper dissolution was 37-42% during the period of 0.5-6 h. The gold extraction by cyanide leaching from the pretreated sample was reported to substantially increase to 99% over the short period of only 2 h. Within this regard, the current findings (Figure 4) implies that the high copper content (1.6%) of the ore used in the current study may not be apparently responsible for the low gold extractions in cyanide leaching.

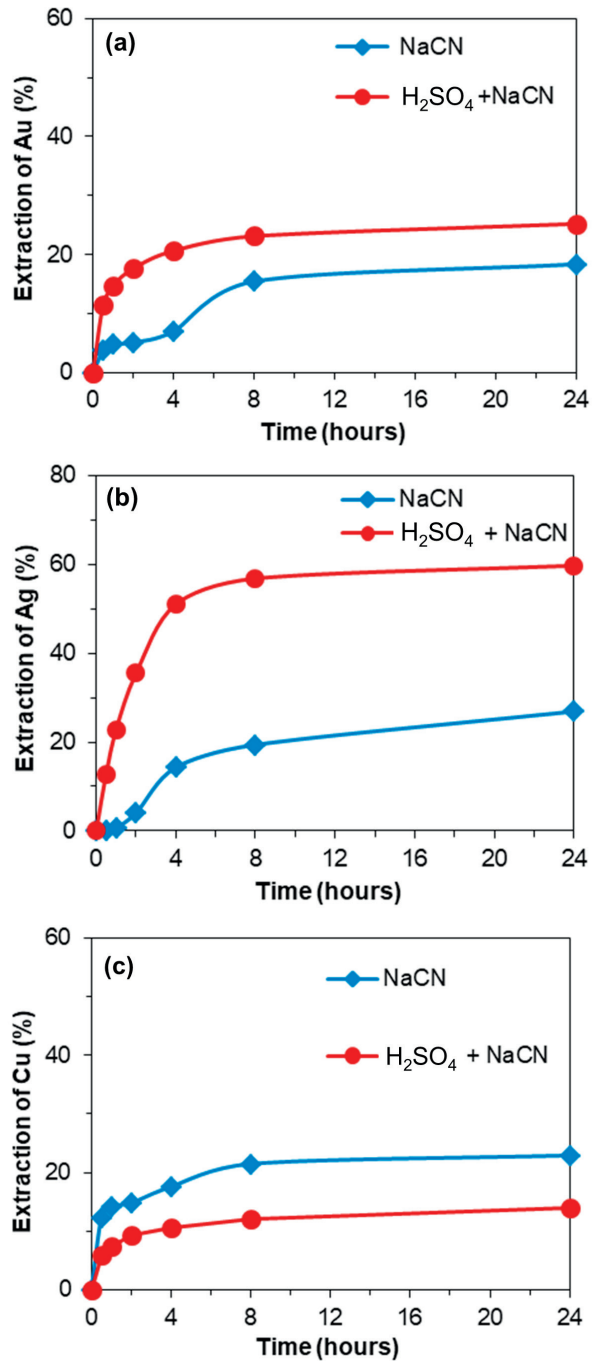


Figure 4. Extraction of gold (a), silver (b) and copper (c) in cyanide leaching (1.5 g/L NaCN, 25% w/w solids, Air flow rate: 1.5 L/min, pH 10.5-11) with/without 1 M H₂SO₄ pretreatment (2 h)

A series of leaching tests were also carried out at high cyanide concentrations (up to 8 g/L NaCN) in an attempt to increase gold recoveries by maintaining sufficiently high levels of cyanide (Figure 5).

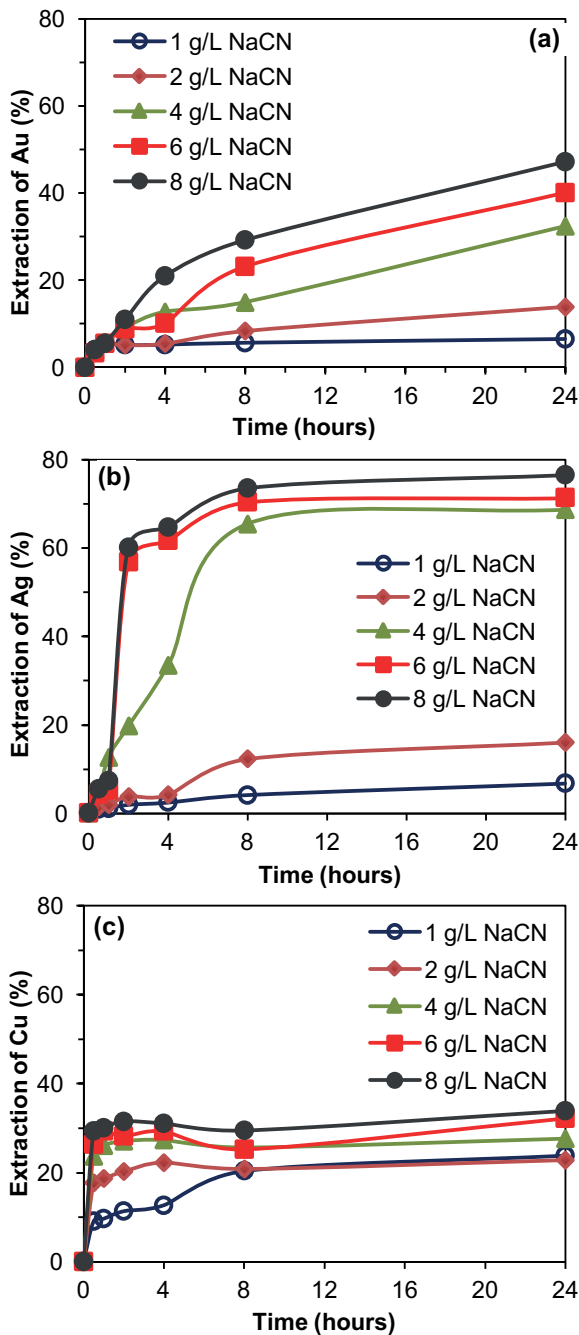


Figure 5. Effect of cyanide concentration on the extraction of gold (a), silver (b) and copper (c) (Leaching time: 24 h., Air flow rate: 1.5 L/min, 25% w/w solids ratio, pH 10.5-11)

Increasing the cyanide concentration did not produce the desired effect. Only 47.2% of gold was extracted at the highest NaCN level of 8 g/L (Figure 5a). Silver extraction was improved from 6.7% (1 g/L NaCN) to 76.4% (8 g/L NaCN) (Figure 5b). This gave a clear picture of how reagent

could be wasted in treating such kind of ores, yet the gold extractions still remain unacceptably poor. A slight change of about 10% for copper extraction was observed i.e. from 23.86% (1 g/L NaCN) to 33.9% (8 g/L NaCN). On the contrary to the current findings (Figure 5a), Bas et al. (2015) found that high gold extractions (>97%) could be achieved by cyanide leaching of a copper-rich gold ore (56 g/t Au, 1.1% Cu) at >5 g/L NaCN.

Increasing the cyanide concentration (Figure 6) was also noted to further aggravate the cyanide consumption. A 5.54-fold increase (i.e., from 3.1 kg/t to 17.2 kg/t) in the reagent consumption was recorded by increasing the initial cyanide level from 1 g/L to 8 g/L NaCN. Copper minerals are particularly responsible for high reagent consumption given their comparatively high solubility (17.8% acid-soluble copper present in the ore, Figure 4) in cyanide solutions (Equations 1-5).

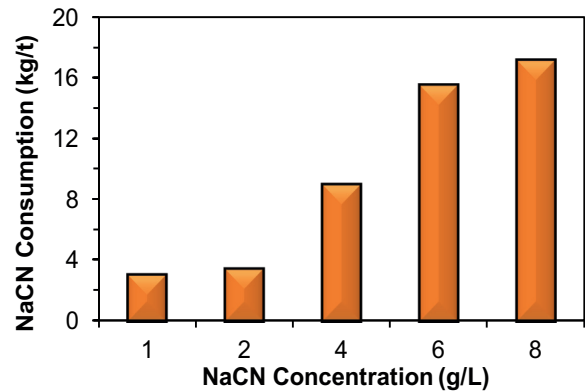


Figure 6. Total cyanide consumptions (kg NaCN per tonne ore) at different cyanide concentrations (Leaching time: 24 h., Air flow rate: 1.5 L/min, 25% w/w solids ratio, pH 10.5-11)

Figure 7 shows the speciation of copper(I)-cyanide complexes as a function of the concentration of cyanide. Other side reactions may also contribute further to cyanide consumption such as the formation of thiocyanate through reactions with sulphide minerals (Equations 3, 5), reaction of other metals with cyanide, reduction of copper(II) released from Cu(II)-sulphides, Cu(II) catalysed oxidation of cyanide in the presence of air, increased the consumption of cyanide and partial volatilisation of cyanide as HCN (Adams, 2016; Hayes and Corrans, 1992; Yazici et al., 2009).

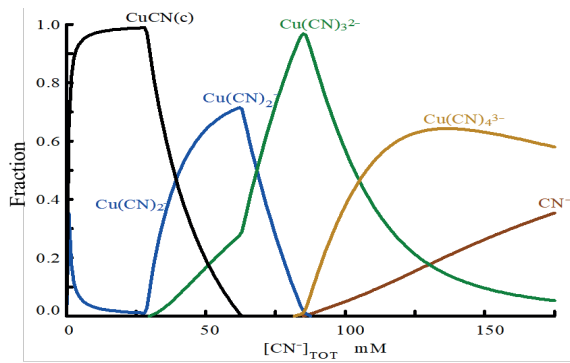


Figure 7. Speciation of copper(I)-cyanides depending on the concentration of cyanide (Cu(I): 29 mM, pH 10.5, 25 °C) (Medusa, 2009).

It can be inferred from these findings (Figures 4-6) that the low gold extraction is not only linked with the presence of copper in the ore. Intensive cyanide leaching and acid pretreatment for leaching/removing copper prior to cyanide leaching exerted a limited enhancing effect on gold extraction. This suggests that the remained refractory gold may be present as locked-up in pyrite and/or non-sulphide gangue minerals. Therefore, ultra-fine grinding ahead of intensive cyanide leaching at 8 g/L NaCN was also investigated to reveal the possible physical refractoriness of the ore.

2.2. Effect of Ultra-fine Grinding (UFG)

This approach was employed as a physical pretreatment to enhance the extraction of gold. This technique is applied to set free the grains of gold finely distributed in gangue minerals. The ore samples ($d_{80}=73 \mu\text{m}$) ground for 15, 30 and 45 minutes resulted in the production of materials with a fineness (d_{80}) of 23 μm , 15 μm , 8 μm , respectively. Figure 8 illustrates the results of cyanide leaching of the ground samples for 24 hours. There was no remarkable effect of the ultra-fine grinding on the extraction of gold, even though the sodium cyanide concentration used in this experiment was kept high at 8 g/L (Figure 8a). Reducing the size of the ore from 73 μm to 15 μm produced only a limited improvement by 6.9% in gold extraction i.e., from 47.2% to 54.1%. Further reduction in the ore size from 15 μm to 8 μm appeared to adversely affect the gold extraction with a 7.74% reduction (Figure 8a). This could be linked with the increased reagent consumption due to the formation of more active/fresh surfaces

and/or, coating/passivation of gold and gold-carrying minerals by fine particles (slime). UFG also did not enhance the extraction of silver (not shown). Copper dissolution appeared to be increased by 24% with grinding the ore from 73 μm to 8 μm (Figure 8b). The limited improvement of gold/silver extraction by UFG can be attributed to the liberation/exposure of the physically encapsulated gold/silver grains at these sizes, allowing their contact with cyanide.

On the contrary to the current findings (Figure 8), some researchers reported the beneficial effect of UFG on the extraction of gold by cyanide leaching. Celep et al. (2016) noted a significant improvement (from 45% to 85%) in the gold extraction from a pyritic concentrate after ultra-fine grinding as a pretreatment method before the cyanidation. They reported that fine grinding of the concentrate, as well as high cyanide concentrations (>5 g/L), are required to achieve acceptably high gold extractions. Ellis and Gao (2002) also observed a 19.7% enhancement in the extraction of gold (from 74.3% to 93.9%) at Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM) after UFG of the ore from 130 μm to 5 μm .

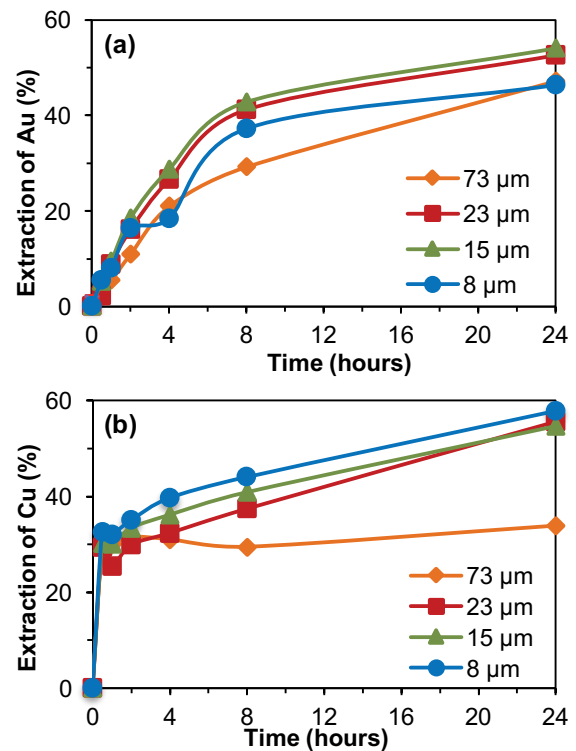


Figure 8. Effect of ultra-fine grinding on the extraction of gold (a) and copper (b) (8 g/L NaCN, 25% w/w solids ratio, Air flow rate: 1.5 L/min, pH 10.5-11)

Figure 9 depicts the effect of decreasing particle size on the amount of total cyanide consumed over the leaching period of 24 hours. The cyanide consumption increased (by 1.77-fold) from 17.2 kg/t to 30.4 kg/t with UFG of the ore from 73 μm to 8 μm . This is apparently concomitant with the increased dissolution of copper (Figure 8b) and probably other cyanide-consuming constituents due to the expected increase in surface area or activation of minerals. Ellis and Gao (2002) also observed a beneficial effect of UFG from 130 μm to 5 μm on gold extraction at the expense of 7.1-fold higher cyanide consumption.

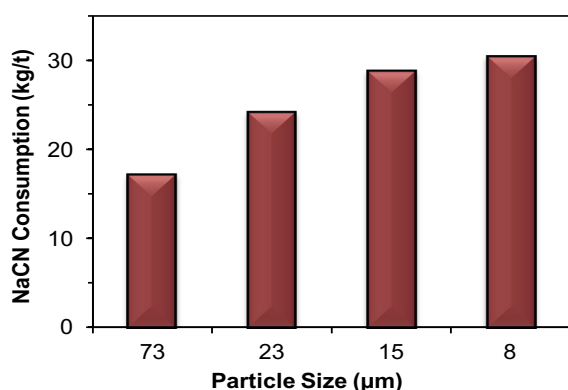


Figure 9. Total cyanide consumptions (kg NaCN per tonne ore) at different particle sizes (Leaching time: 24 h., Air flow rate: 1.5 L/min, 25% w/w solids ratio, pH 10.5-11)

These findings (Figures 4-9) revealed that gold recoveries were still low (<54.1%) even when the ultra-finely ground ore (down to 8 μm) was subsequently leached at high levels of cyanide (i.e., 8 g/L NaCN). This suggests that the ore can be classified as a double-refractory gold ore due to its high copper content and the presence of gold apparently recalcitrant to cyanidation. Chemical pretreatment methods such as roasting/biooxidation/pressure oxidation, which are capable of improving gold extraction from sulphide ores, should be therefore tested for eliminating the refractoriness of the ore before cyanide leaching.

CONCLUSION

The recovery of gold from a copper-rich gold ore (108 g/t Au, 1.60% Cu) by cyanide leaching was investigated. Low gold recoveries (18.4% over 24

h.) obtained by direct cyanide leaching (1.5 g/L NaCN) indicated highly refractory nature of the ore. Acid pretreatment (1 M H_2SO_4) tested for the removal of acid-soluble copper was found to improve cyanide leaching of gold only to a limited extent. The ore was also leached at high cyanide concentrations i.e., up to 8 g/L NaCN, to overcome soluble copper interference with gold extraction. However, it was limited to 47.2% Au even at the highest level of NaCN concentration (8 g/L) tested. To eliminate the physical refractoriness of the ore, ultra-fine grinding (UFG) (d_{80} : from 73 μm to 8 μm) prior to cyanide leaching was also carried out at 8 g/L NaCN. UFG did not enhance the extractions of gold, to the desired extent, which was limited to $\leq 54.1\%$ Au. Low gold extractions obtained using these pretreatments and intensive cyanide leaching indicate the refractory nature of the ore, apparently linked with the encapsulation of very fine gold in sulphides e.g., pyrite as well as chemical interference of reactive minerals with cyanide leaching. It can be inferred that chemical pretreatment options such as roasting, biooxidation and pressure oxidation should be examined to increase the exposure of gold grains locked-up within sulphides.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Mastra Gold Mine (Koza Gold Operations) for providing the ore sample and Dakot Milling Media (Pty) Ltd (South Africa) for kindly providing the ceramic micro-grinding beads (DMM AZ 2000®). The financial support by the Office of Scientific Research Projects of Karadeniz Technical University (Project no's: FBA-2018-7399) is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Adams, M. D., 2016. Gold Ore Processing: Project Development and Operations. Second Ed, ISBN 978-0-444-63658-4, Vol 15, Elsevier.
- Ahlatcı, F., Koç, E., Kuzu, M., Yazıcı, E., Celep, O., Deveci, H., 2016. Sulphide Precipitation of Gold and Silver from Thiosulphate Leach Solutions. XV. International Mineral Processing Symposium, Istanbul, Turkey, 750-760
- Ahlatcı, F., Yazıcı, E.Y., Celep, O., Deveci, H., 2018. Thiosulphate Leaching of Gold/Silver from a Copper-Bearing Pyritic Gold Concentrate. XXIX. International Mineral Processing Congress (IMPC), Paper no: 185, 17-21.

- Akçay, M., Gündüz, Ö., 2004. Porphyry Cu–Au Mineralisation Associated with a Multi-Phase Intrusion and Related Replacement Fronts in Limestones in an Island Arc Setting Near the Gümüşhane Village (Artvin) In The Eastern Black Sea Province (Turkey). *Chemie Der Erde - Geochemistry*, 64, 359-383.
- Aylmore, M.G., Muir, D.M., 2001. Thiosulphate Leaching of Gold- A Review. *Minerals Engineering*, 14, 135-174.
- Bas, A. D., Koç, E., Yazıcı, E. Y., Deveci, H., 2015. Treatment of Copper-Rich Gold Ore by Cyanide Leaching. *Leaching. Trans Nonferrous Met. Soc. China*, 25 (2), 597-607.
- Bas, A. D., Yazıcı, E. Y., Deveci, H., 2012. Treatment of Copper Rich Gold Ores by Ammonia Assisted Cyanide Leaching. *Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC)*, New Delhi, India, 356–365.
- Bascombe, L., Mach, L., Altman, K.A., 2013. Technical Report on the Çöpler Mineral Resource Update Erzincan Province. Turkey, No. Canadian National Instrument, 43-101, Alacer Gold.
- Celep, O., 2011. Application of Alkaline Pretreatments for Gold and Silver Recovery from Refractory Ores. PhD Thesis, Karadeniz Technical University. The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mining Engineering, Trabzon, May, 157 pp.
- Celep, O., 2015. Processing of Gold Ores. *Türkiye Alim Kitapları*, 220 pp (in Turkish).
- Celep, O., Altinkaya, P., Yazıcı, E.Y., Deveci, H., 2016. Effect of Ultra-fine Grinding on Cyanide Leaching of Copper Bearing Pyritic Gold Concentrate. *Proceedings of XV. International Mineral Processing Symposium and Exhibition (IMPS)*, Istanbul-Turkey, 1255-1269.
- Celep, O., Altinkaya, P., Yazıcı, E.Y., Deveci, H., 2018. Nitric Acid Leaching for Pre-Treatment of a Copper Bearing Auroferrous Pyritic Concentrate. *XXIX. International Mineral Processing Congress (IMPC)*, Paper no: 184, 17-21.
- Chryssoulis, S.L., McMullen, J., 2016. Mineralogical Investigation of Gold Ores. *Gold Ore Processing-Project Development and Operations*. Editor Mike Adams, Elsevier, 57-93.
- Deveci, H., Yazıcı, E.Y., Celep, O., 2018. An Overview of Pre-treatment and Leaching Options for Gold Extraction from Refractory Copper-Gold Ores. *16th International Mineral Processing Symposium and Exhibition (IMPS)*, Antalya, 439-451.
- Ellis, S., Gao, M., 2002. The Development of Ultra-fine Grinding at KCGM. *SME Annual Conference*, Preprint 02-072.
- Fleming, C.A., Mezei, A., Bourricaudy, E., Canizares, M., Ashbury, M., 2011. Factors Influencing the Rate of Gold Cyanide Leaching and Adsorption on Activated Carbon, and their Impact on the Design of CIL and CIP Circuits. *Minerals Engineering*, 24, 6, 484-494.
- Fleming, C.A., 2011. Dealing with Cyanide-Soluble Copper in the Gold Mining Industry. *Fray International Symposium on Metals and Materials Processing in a Clean Environment*. Mexico, 173-190.
- Habashi, F., 1999. *A Textbook of Hydrometallurgy. Metallurgie Extractive Quebec Publications*, Canada, 220-223.
- Hayes, G. A., Corrans, I. J., 1992. Leaching of Gold-Copper Ores Using Ammoniacal Cyanide. *Proceedings of International Conference on Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals*, Melbourne, Australasian Inst Min Metall, 349-353.
- Hedley, N., Tabachnick, H., 1958. *Chemistry of Cyanidation*. Mineral Dressing Notes No. 23, American Cyanamid Company, New Jersey.
- Kesler, S.E., Chryssoulis, S.L., Simon, G., 2002. Gold in Porphyry Copper Deposits: Its Abundance and Fate. *Ore Geology Review*, 21 (1-2), 103-124.
- Marsden, J., House, I., 2006. *The Chemistry of Gold Extraction*. 2nd Edition, The Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc., USA, 318-392.
- Medusa, 2009. *Software for Chemical Equilibrium Diagrams*. 32 bit version, Royal Institute of Technology, Sweden.
- Muir, D.M., 2011. A Review of the Selective Leaching of Gold from Oxidized Copper-Gold Ores with Ammonia-Cyanide and New Insights for Plant Control and Operation. *Minerals Engineering*, 24, 576-582.
- Sceresini, B., Breuer, P., 2016. *Gold-copper Ores. Gold Ore Processing*, 2nd Edition, Chapter 43, Editor: Adams, M. D., Elsevier.
- Sinclair, W.D., 2007. *Porphyry Deposits*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, Canada, 223-243.
- URL-1, <http://kozaaltin.com.tr/operasyonlar-ve-projeler/kaymaz-altin-madeni>, 02 August 2013.
- URL-2, <https://www.alacergold.com/operations/resources-and-reserves>, 29 July 2020.
- URL-3, <http://marianaresources.com/projects/hot-maden/> 24 March 2016.
- Yazıcı, E. Y., Deveci, H., Alp, I., 2009. Treatment of Cyanide Effluents by Oxidation and Adsorption in Batch and Column Studies. *Journal of Hazardous Materials*, 166 (2-3), 1362-1366.
- Yazıcı, E.Y., Ahlatci, F., Koc, E., Celep, O., Deveci, H., 2015. Pre-treatment of a Copper-rich Gold Ore for Elimination of Copper Interference. *8th European Metallurgical Conference (EMC)*, Dusseldorf, Vol. 2, 601-613.
- Yılmaz, E., Yazıcı, E.Y., Celep, O., Deveci, H., 2019. Recovery of Cyanide from Effluents: SART Process. *Gumushane University Journal of Science and Technology Institute*, 9 (3), 600-615 (in Turkish).
- Yigit, O., 2006. Gold in Turkey- A Missing Link in Tethyan Metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 28, 147-179.



Orijinal Araştırma / Original Research

GAZLAŞTIRMA TESİSİ ODUN ATIĞI VE SİVAS KANGAL LİNYİT KÖMÜRÜNÜN BOYA ADSORPSİYONUNDA KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION ON USAGE POSSIBILITIES OF GASIFICATION PLANT WOOD WASTE AND SİVAS KANGAL LIGNITE COAL IN DYE ADSORPTION

Ramazan Kıрма^{a,*}, Musa Sarıkaya^{b,**}, Soner Top^{c,***}, Şükrü Uçkun^{b,****}, İrfan Timür^{b,*****}

^a Gümüşhane Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı, Gümüşhane, TÜRKİYE

^b İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Malatya, TÜRKİYE

^c Abdullah Gül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Kayseri, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 27 Mayıs / May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 07 Eylül / September 2020

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Odun atığı,
Linyit kömürü,
Metilen mavisi,
Adsorpsiyon.

Bu çalışmada Sivas Kangal linyit kömürü ile Gebze MDF ve Yonga Levha Gazlaştırma Tesisi ön çalışmalarında elde edilen odun atığının adsorban olarak kullanılma olanakları araştırılmıştır. Böylelikle hem atıkların değerlendirilmesi hem de daha ucuz ve kolay elde edilen malzemeler ile çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlanmıştır. -75 µm boyutuna kırılıp öğütülen ve adsorban olarak kullanılan odun atığı ve kömür numunelerinin yapı ve yüzey özellikleri XRD, SEM ve BET analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca kül, nem, uçucu madde ve sabit karbon içerikleri ile elementel analizleri yapılarak numuneler karakterize edilmiştir. Deneylerde boyar madde olarak $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot xH_2O$ formülasyonuna sahip metilen mavisi (MM) kullanılmıştır. Sıcaklık, karıştırma süresi ve derişim parametrelerinin MM adsorpsiyonu üzerine etkileri araştırılmıştır. Optimum konsantrasyonlarda değişik sıcaklıklar için Langmuir izotermi oluşturulmuştur. Sonuç olarak mevcut çalışma ile adsorban olarak tercihen linyit kömürü ve odun atığının kullanılabileceği ortaya konulmuştur. Linyit kömürü için 10 ppm ve odun atığı için ise 3 ppm MM konsantrasyonlarının adsorpsiyon için ideal derişimler olduğu belirlenmiştir.

Keywords:

Wood waste,
Lignite coal,
Methylene blue,
Adsorption.

ABSTRACT

In this study, the usage possibilities of wood waste obtained from Gebze MDF and Particle Board Gasification Plant preliminary studies and Sivas Kangal lignite coal as adsorbents were investigated. In this way, it was aimed both to evaluate the wastes and to prevent environmental pollution with materials that are cheaper and easier to obtain. The structure and surface properties of wood waste and coal samples crushed and ground to -75 µm size and used as adsorbent were investigated by XRD, SEM and BET analyses. In addition, samples have been characterized by elemental, ash, moisture, volatile matter and fixed carbon analyses. In the experiments, methylene blue (MM) with the formulation of $C_{16}H_{18}ClN_3S \cdot xH_2O$ was used. The effects of temperature, mixing time and concentration parameters on MM adsorption were investigated. Langmuir isotherms were created for different temperatures at optimum concentrations. As a result, it has been revealed that lignite coal and wood waste can be used as adsorbent. A 10 ppm MM for lignite coal and 3 ppm MM for wood waste were determined to be ideal concentrations for adsorption.

* ramazankirma@gumushane.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-6116-5824>

** musa.sarikaya@inonu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4942-4472>

*** soner.top@agu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-3486-4184>

**** Sorumlu yazar / Corresponding author: uckun.sukru1@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-8798-1398>

***** irfan2344@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-8289-5108>

GİRİŞ

Çevre kirliliği küresel ölçekte günümüzdeki en önemli sorunlardan biridir. Endüstriyel boyarmadde atık suları kompleks boya karışımlarıyla birlikte kimyasallardan, asitlerden, bazlardan, tuzlardan ve ağır metallerden meydana gelmektedir. Boyarmadde giderimi, bu çeşit atıkların artması ile birlikte temel sorunlardan biri haline gelmiştir. Geleneksel arıtım metotları kullanılmakla birlikte arıtımda istenilen verimlerin sağlanmasında sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu sebeptendir ki organik ve inorganik matrislere adsorpsiyon, fotokataliz, kimyasal oksidasyon, mikrobiyolojik veya enzimatik ayrıştırma gibi alternatif arıtım yöntemleri eklenmiştir. Geleneksel metot kullanılarak atık su arıtım tesislerinde atık suların sentetik boyarmaddelerin giderimi suda reaktif boyaların varlığında daha da güç olmaktadır (Santos vd., 2008; Şener, 2008).

Boyarmaddelerin atık suların temizlenmesinde, suyun çeşidine ve suyun temizlendikten sonra kullanım amacına göre farklı metotlar kullanılmaktadır. Günümüzde büyük oranlarda renkli atık su gideriminde fiziksel ve kimyasal yöntemler uygulanmaktadır. Ancak kimyasal yöntemin maliyeti yüksektir (Kocaer ve Alkan, 2002). Adsorpsiyon, renkli atık suların gideriminde etkili bir yöntemdir. Aktif karbon, adsorpsiyon kapasitesi yüksek olan ve en çok kullanılan adsorplayıcıdır. Son zamanlarda aktif karbon maliyeti yüksek olduğundan, renkli atık su gideriminde maliyeti düşük linyit (Mahramanlioğlu ve Arkan, 2002; Depci vd., 2011), kil (Tahir ve Rauf, 2006; Bayar, 2018; Türkyılmaz, 2018), fındık kabuğu (Abak, 2008), uçucu kül (Şener, 2008; Korkmaz vd., 2014), kestane kabuğu, kayısı çekirdeği (Kayman, 2009), doğal zeolit (Han vd., 2010), çay fabrikası atıkları (Gündoğdu, 2010), at kestanesi, meşe palamudu (Murathan ve Koçyiğit, 2013), nar kabuğu (Gündüz ve Bayrak, 2017), zeytin atıkları (Toumi vd., 2018), atık plastikler (Kaur vd., 2019), balık kılçıklarından elde edilmiş hidroksiapatit (Hernández-Cocoletzi vd., 2020) gibi adsorplayıcılar kullanılması ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca fosil mineral kaynaklarından biri olan diatomitler düşük maliyetleri, yüksek yüzey alanı ve adsorpsiyon kapasitesi sağlayan fizikokimyasal özelliklerinden ötürü adsorpsiyon işlemlerinde yüzey modifikasyonu ile veya

direkt olarak kullanılmaktadır (Sriram vd., 2020). Yöntemlerin çoğu aktif karbon adsorpsiyonu ve kimyasal koagülasyon gibi birçok işlemin bir arada kullanılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte adsorpsiyon, renk gideriminde en etkin proseslerden biridir.

Her ne kadar linyitlerden üretilen aktif karbonlar boya adsorpsiyonunda yaygın olarak kullanılsa da linyitlerin ve odun atıklarının direkt olarak metilen mavisi adsorpsiyonunun kullanımına ilişkin çalışmalar literatürde oldukça sınırlıdır. Linyitlerin ve odun atıklarının diğer adsorbanlarla kıyaslandığında çok ucuz elde edilmeleri nedeni ile adsorban olarak kullanılabilirleri avantaj yaratacaktır. Ayrıca linyitlerin direkt olarak kullanılması; aktif karbon hazırlanması için gerekli olan piroliz işleminden kaçınılması ve maliyetin azalması anlamına gelmektedir. Ancak linyitin yapısındaki kil, potasyum, kalsiyum gibi elektrolitlerin tutarsızlığı, sülfür içeriği, yüzeyindeki fonksiyonel grupların türü ve dağılımı, adsorbanın asidik, bazik ya da nötr durumda olması gibi faktörler adsorpsiyon ortamında kararsızlıklara sebep olabilmektedir. Gülensoy ve Mahramanlioğlu (1998), linyitlerle yaptıkları adsorpsiyon çalışmalarında adsorpsiyon kabiliyetinin artandan azalana doğru uçuculuğu alınmış, asit ile aktifleştirilmiş, nemi alınmış ve orijinal linyitler şeklinde sıralandığını belirlemişlerdir. Uçuculuğu alınmış kömürün karbon oranı ve yüzey alanının diğerlerinden daha yüksek olması bu durumun birincil sebebi olarak görülmektedir. Mahramanlioğlu vd. (2002), adsorpsiyon çalışmalarında karbonizasyon ve aktivasyon işlemlerine ilaveten asit ile kül giderimi gerçekleştirdikleri linyitleri kullanarak adsorpsiyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir.

Bu çalışmada ham linyit ve gazlaştırma tesisi odun atığı kullanılarak atık suların MM uzaklaştırılması araştırılmıştır.

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Malzemeler

1.1.1. Metilen Mavisi

Deneylerde kullanılan Merck marka MM'nin kimyasal formülü $C_{16}H_{18}ClN_3 \cdot xH_2O$ ve molekül ağırlığı 319,85 g/mol'dür. Suyu kuvvetle tutma özelliği olan koyu mavi renkte bir boyarmadde. Metilen mavisi kimya, biyoloji ve tıp gibi alanlar

başta olmak üzere tekstil, kağıt, deri ve plastik endüstrisinde en çok kullanılan boyarmaddelerden biridir. MM ısıya karşı oldukça duyarlıdır ve 110 °C' de 2 saat kadar bırakıldığında yaklaşık kütle kaybı % 14 olmakta ve kötü koku yaymaktadır. Susuz MM % 94,5 saflıktadır ve sulu çözeltide köpük oluşturmaktadır. Ayrıca 664 nm dalga boyunda maksimum absorpsiyon özelliğine sahiptir (Ho ve McKay, 1998).

1.1.2. Kullanılan Linyit Kömürü ve Odun Atıkları

Deneylerde Sivas Kangal linyit kömürleri ile Gebze MDF ve Yonga Levha Gazlaştırma tesisi çalışmasından elde edilen odun atıkları malzemeler (75 µm boyut altında) kullanılmıştır.

1.2. Kullanılan Düzenekler, Aletler ve Yöntemler

Numunelerin hazırlanması işleminde Gümüşhane Üniversitesi Merkezi Araştırma Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde çeneli kırıcı olarak Retsch marka BB200 model ve öğütücü olarak Retsch marka RS 200 model boyut küçültücü aletler kullanılmıştır. Numunelerin elenmesinde paslanmaz çelik 75 µm boyutlu elekler kullanılmıştır. Numuneler WiseVen marka Won modeli sirkülasyonlu etüvde kurutulmuştur. Kül oranlarının tayininde MTI marka KSL 1800X model kül fırını ve uçucu madde tayini için ise MTI marka GSL 1800X silindir model fırın kullanılmıştır.

İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi'nde SEM analizleri LEO-EVO 40, SEM-EDX analizleri Bruker-125 eV, XRD analizleri Rigaku Geigerflex D/MaxB ve elementel analizler LECO CHNS-932 model cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca BET analiz işlemlerinde Micromeritics TriStar 3000 cihazı kullanılmıştır. Karıştırma işlemlerinde ve farklı sıcaklıklardaki adsorpsiyon çalışmalarında Daihan marka 6'lı WiseStir dijital manyetik model olan ısıtıcı ve karıştırıcı cihaz kullanılmıştır. Numune miktarları ölçümünde Shimadzu marka ATX224 model analitik terazi kullanılmıştır. Deneylerde WTW marka inolab7110 model pH metre ve JENCO marka 3173 iletkenlik ölçer kullanılmıştır. Adsorpsiyon işlemlerinde Agilent marka Cary 60

UV-VİS model ile VWR marka UV-3100PC model UV spektrofotometreler kullanılmıştır.

1, 5, 10, 15, 20 ve 25 mg/L derişimlerdeki metilen mavisi 1 litre saf suya eklenerek hazırlanan çözeltilere 0,1 gr Sivas Kangal linyit kömürü veya Gazlaştırma tesisi odun atığı ilave edilerek karıştırma hızı 300 devir/dk olan manyetik karıştırıcıda 25 °C, 35 °C ve 50 °C sıcaklıklarda 3 saat boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi esnasında zamana bağlı olarak alınan numuneler 0,45 µm şırıngalarla süzölmüştür. Elde edilen süzöntüler kullanılarak 664 nm dalga boyunda UV spektrofotometrede ölçümler alınmıştır. UV spektrofotometresinde elde edilen değerler aşağıda belirtilen Eşitlik 1 kullanılarak adsorpsiyon miktarları belirlenmiştir.

$$\text{Ads (\%)} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} * 100 \quad (1)$$

C_0 = Başlangıçtaki çözelti konsantrasyonu (mg/L)

C_t = t anındaki çözelti konsantrasyonu (mg/L)

Ads = Adsorplanan boya miktarı (%)

Langmuir izotermi, katı bir yüzey üzerinde fiziksel veya kimyasal adsorpsiyon meydana gelip gelmediğini diğer izotermilere kıyasla daha iyi açıklayabilmektedir. Langmuir izoterminde adsorpsiyon, başlangıç adsorbat konsantrasyonu ile doğrusal olarak artar. Maksimum doygunluk sırasında, yüzey tek katman ile kaplanmakta ve yüzeye tutunmuş olan adsorbat miktarı değişmeyerek sabit kalmaktadır. Adsorpsiyon enerjisi, Langmuir izoterminde homojendir. Adsorbe hızı adsorbat konsantrasyonu ve yüzeydeki boş bölgeler ile doğru orantılıdır. Desorpsiyon hız oranı ise yüzeyde adsorbe edilmiş molekül parçacık sayısı ile doğru orantılıdır (Langmuir, 1916).

Langmuir denklemi;

$$q_e = \frac{q_0 \cdot b \cdot C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (2)$$

q_e = Dengede adsorplanan madde miktarı (mg/g).

q_0 = Yüzeyin tek tabaka olarak kaplanabilmesi için gerekli miktar (mg/g).

b = Langmuir sabiti (L/mg).

C_e = Adsorbat denge konsantrasyonu (mg/L)

Denklem lineerleştirilirse;

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b \cdot q_0} + \frac{C_e}{q_0} \quad (3)$$

Eşitlikleri ile (Eşitlik 2 ve Eşitlik 3) elde edilir. C_e değerine karşılık C_e/q_e değeri grafiğe geçirilerek b ve q_0 değerleri bulunur. Langmuir tipi adsorpsiyon denklemlerinde adsorpsiyonun makullüğünü bulmak için boyutsuz RL değeri (dağılma sabiti) Eşitlik 4 yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$RL = \frac{1}{1+b \cdot C_0} \quad (4)$$

Adsorpsiyonun gerçekleşmesi için RL değerinin 0-1 arasında olması gerekmektedir. Aksi takdirde adsorpsiyon olayı gerçekleşmemektedir (Langmuir, 1916).

2. ADSORBANLARIN KARAKTERİZASYONU

Nem, kül, uçucu madde ve sabit karbon değerleri ASTM D7582 – 15 standartlarına göre yapılan analizlerle belirlenmiş ve analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir (ASTM, 2015).

Çizelge 1. Linyit kömürü ve odun atığı kısa analiz sonuçları

| Adsorban | Nem (%) | Kül (%) | Uçucu madde (%) | Sabit karbon (%) |
|---------------|---------|---------|-----------------|------------------|
| Linyit kömürü | 8,01 | 35,54 | 51,32 | 13,14 |
| Odun atığı | 3,26 | 82,35 | 2,16 | 15,49 |

Çizelge 1 incelendiğinde linyit kömürünün nem oranının % 8,01 olduğu görülmektedir. Kül miktarı ortalama % 35,54 olarak bulunmuştur. Sivas Kangal linyit kömürünün kül oranı yüksektir. Uçucu madde oranı ise % 51,32 olup diğer linyit kömürlerine göre uçucu madde miktarı düşüktür. Deneylerde kullanılan odun atığının nem oranı % 3,26'dır. Kül oranı ise % 82,35 olup bünyesinde yüksek oranda kül barındırmaktadır. Uçucu madde miktarı % 2,16 ve sabit karbon oranı % 15,49 olarak bulunmuştur.

Numunelerin elementel analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde odun atığının karbon oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun yanında odun atığında azot ve kükürt oranı düşük ve linyit kömüründe

ise azot ve kükürt oranının yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 2. Linyit kömürü ve odun atığı elementel analiz sonuçları

| Adsorban | C (%) | H (%) | N (%) | S (%) | C/H (%) |
|---------------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Linyit kömürü | 34,78 | 3,94 | 1,06 | 4,00 | 8,82 |
| Odun atığı | 57,27 | 2,62 | 0,19 | 0,16 | 21,68 |

Sivas Kangal linyit kömürünün termik santralde yakılmasıyla elde edilen uçucu küllerin ortalama oksitli içerikleri Çizelge 3'te görülmektedir. CaO içeriğinden ötürü yüksek kireçli kül sınıfına girmektedir. Türker vd. (2009), küllerin kireç, kuvars, anhidrit, kalsit, albit, sanidin ve hematit minerallerini içerdiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 3. Linyit uçucu külünün ortalama analiz değerleri (Türker vd., 2009)

| İçerik | % |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 34,03 |
| Al ₂ O ₃ | 14,93 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,41 |
| CaO | 31,91 |
| MgO | 1,73 |
| SO ₃ | 6,95 |
| K ₂ O | 1,01 |
| Na ₂ O | 0,65 |
| Cl | 0,007 |
| Kızdırma kaybı | 3,60 |

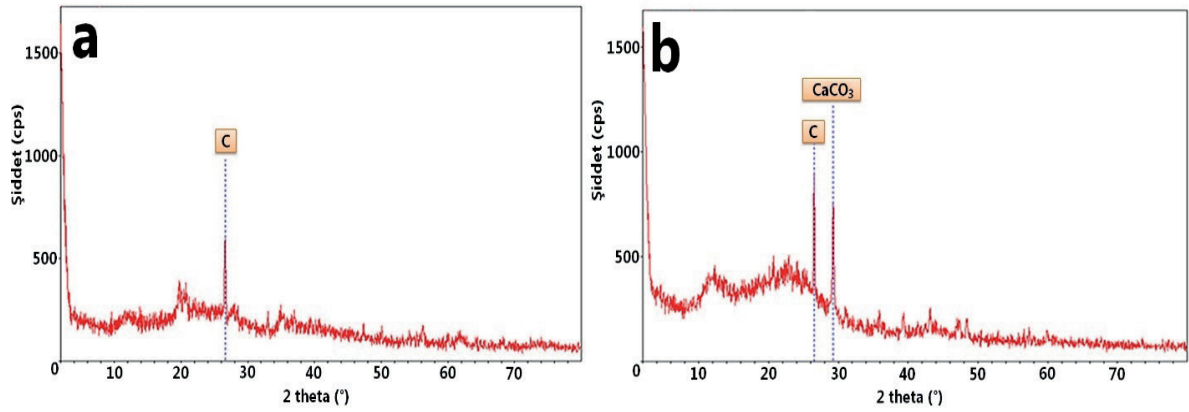
pH ve İletkenlik değerleri doğal ortam değerleri olup 1 ppm MM ile 25 ppm MM içeren çözeltilerde minimum ve maksimum değerler göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Linyit kömürün 25°C, 35°C ve 50°C'de minimum ve maksimum pH değerleri sırasıyla 6,1-6,9, 5,9-6,8, 5,9-6,6 olup iletkenlik değerleri 25°C, 35°C ve 50°C sıcaklıklarda minimum ve maksimum 18-30, 19-33, 20-36 mV olarak hesaplanmıştır. Odun atığının pH değerleri 25°C, 35°C ve 50°C'de minimum ve maksimum 8,2-9,0, 8,1-8,8, 8,0-8,8 olmakla birlikte iletkenlik değerleri 25°C, 35°C ve 50°C sıcaklıklarda minimum ve maksimum 42-64, 44-67, 47-70 mV olarak belirlenmiştir.

Numunelerin BET analiz sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgeye bakıldığında odun atığının yüzey alanı ve mikro gözenek alan değerlerinin linyit kömüründen daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda odun atığının linyit kömürüne göre adsorbe etme özelliğinin fazla olması beklenmektedir.

Çizelge 4. Linyit kömürü ve odun atığı BET analiz sonuçları

| Adsorban | Numune ağırlığı (g) | Yüzey alanı (m ² /g) | Mikro gözenek alanı (m ² /g) |
|---------------|---------------------|---------------------------------|---|
| Linyit kömürü | 0,1 | 0,49 | 8,37 |
| Odun atığı | 0,1 | 2,09 | 34,41 |

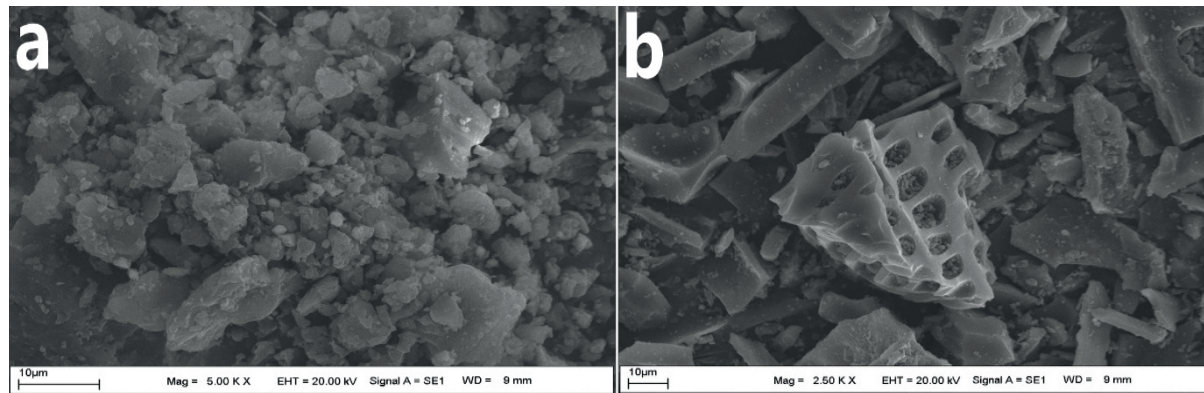
X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), her bir kristal fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması esasına dayanır. Özellikle kayaç içerisindeki mineralleri çözümlemede kullanılan bir yöntemdir. Odun atığı ve linyit kömürüne ait XRD difraktogramları Şekil 1'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde her iki malzemenin çoğunlukla amorf bir yapı sergilediği görülmektedir. Adsorban maddelerin amorf yapıda olmaları adsorpsiyon çalışmalarında tercih edilen bir durumdur. Ancak yapı içerisinde kristal piklerine rastlanmaktadır. Bu durum adsorpsiyon uygulamasında olumsuz sonuçlar ortaya çıkartmakta ve yapı içerisinde oluşan gözenekliliği azaltmaktadır.



Şekil 1. Linyit kömürü (a) ve odun atığının (b) XRD diyagramları

Odun atığı ve linyit kömürüne ait SEM görüntüleri incelendiğinde odun atığının daha keskin köşelere sahip olduğu ve yassı bir yapı gösterdiği linyit kömürünün ise daha yuvarlak ve oval bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Elementel analiz sonucuna göre, odun atığının sabit karbon

oranının fazla olmasına karşın linyit kömürünün sabit karbon oranı daha düşüktür. İki malzemenin SEM görüntüleri göz önüne alındığında linyit kömürünün, odun atığına göre metilen mavisini adsorbe etme kapasitesi daha fazla olması beklenmektedir (Şekil 2).



Şekil 2. Linyit kömürü (a) ve odun atığının (b) SEM görüntüleri

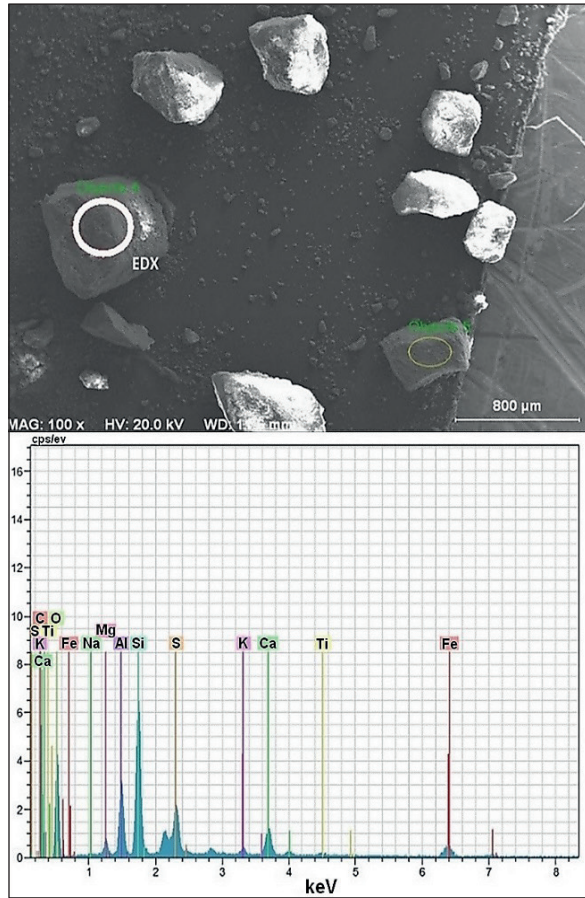
Sivas Kangal linyit kömürünün SEM-EDX görüntüsü Şekil 3'te verilmiştir. Görüntü incelendiğinde kömür yapısının yuvarlak olduğu daha belirgin bir biçimde görülmektedir. EDX analizi için seçilen bölgede on bir adet elemente rastlanmış olup element dağılımı %58,30 O, %28,78 C, %4,75 Si, %2,19 Al, %2,18 S, %1,99 Fe, %1,30 Ca, %0,31 Mg, %0,12 K, %0,08 Ti ve %0,01 Na olarak belirlenmiştir.

SEM-EDX görüntüsü incelendiğinde odun atığının keskin köşeleri daha belirgin bir biçimde görünmektedir (Şekil 4). Bununla birlikte seçilen bölgede yapılan EDX analizi sonucu üç adet elemente rastlanmıştır. Odun atığı için seçilen bölgedeki elementel dağılım %68.65 C, %30,98 O ve %0,36 Ca olarak belirlenmiştir.

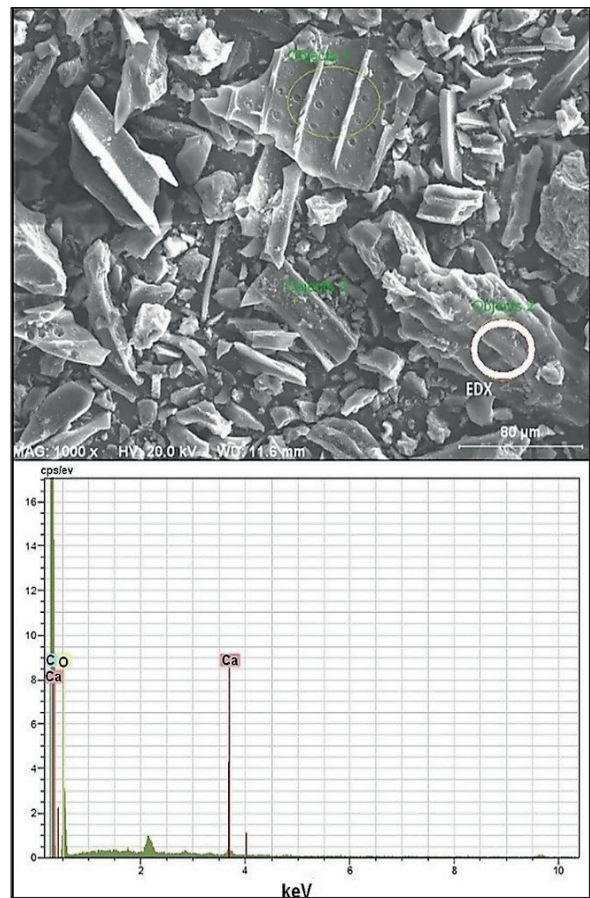
3. ADSORPSİYON ÇALIŞMALARI

3.1. Linyit Kömürü ile Adsorpsiyon Çalışmaları

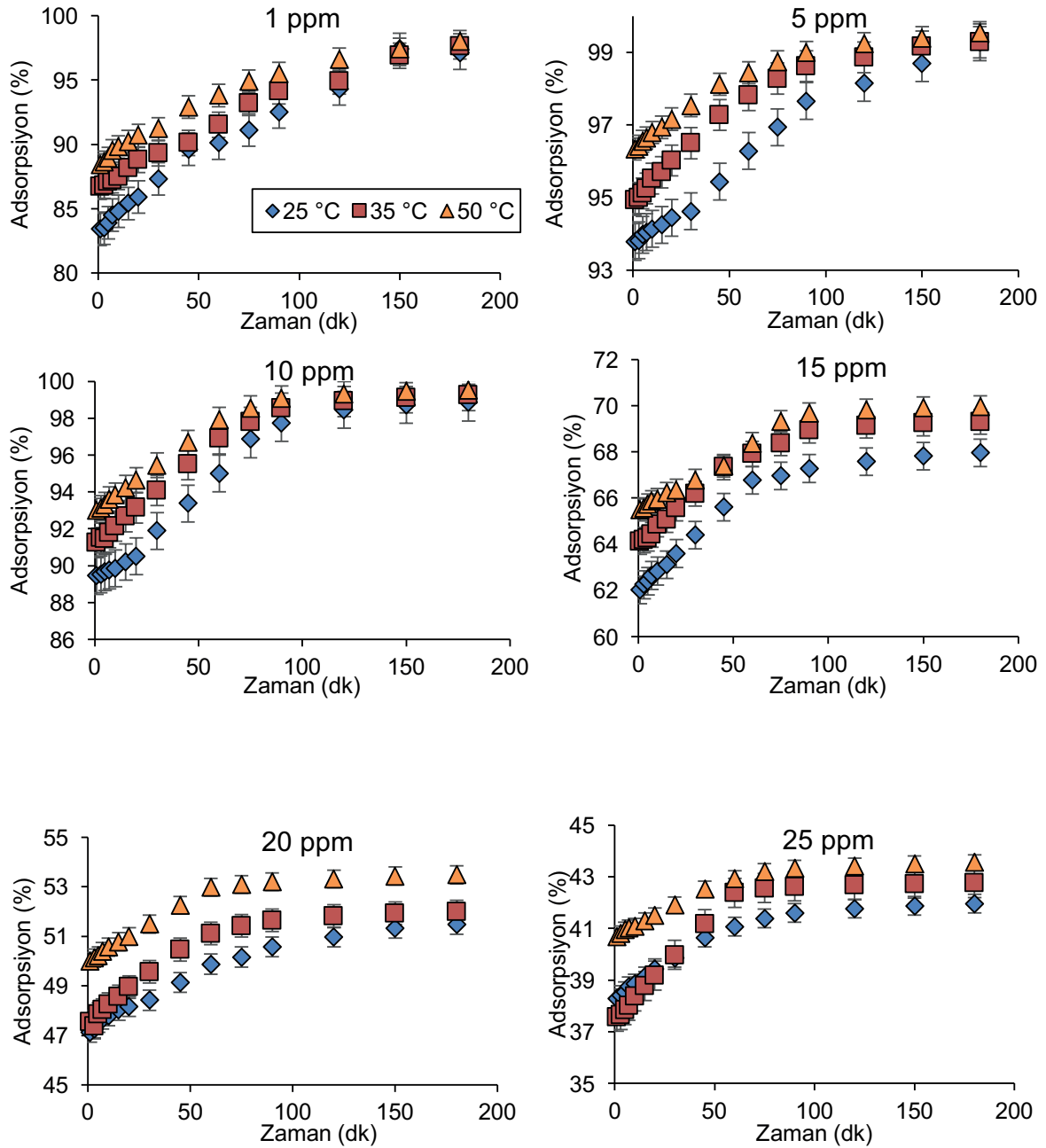
Farklı derişimlerdeki MM çözeltileri değişik sıcaklıklarda karıştırılarak (25°C, 35°C ve 50°C), değişik karıştırma süreleri sonunda linyit kömürü ile adsorpsiyonu incelenmiştir (Şekil 5). Sıcaklığın zamana bağlı olarak adsorpsiyon etkinliğini artırdığı görülmektedir. Ancak ekonomik olarak düşünülduğünde adsorpsiyon verimliliği bakımından 25°C'de adsorpsiyon yapılmasının daha uygun olabileceği sonucuna varılmıştır. 10 ppm'e kadar MM içeren çözeltilerde ilk dakikalardaki en düşük adsorpsiyon yüzdeleri %90 civarında olup en yüksek adsorpsiyon değerleri ortalama %98 düzeyindedir.



Şekil 3. Linyit kömürü SEM-EDX görüntüsü ve element pikleri



Şekil 4. Odun atığı SEM-EDX görüntüsü ve element pikleri



Şekil 5. Değişen konsantrasyonlardaki MM'nin linyit kömürü ile adsorpsiyonu

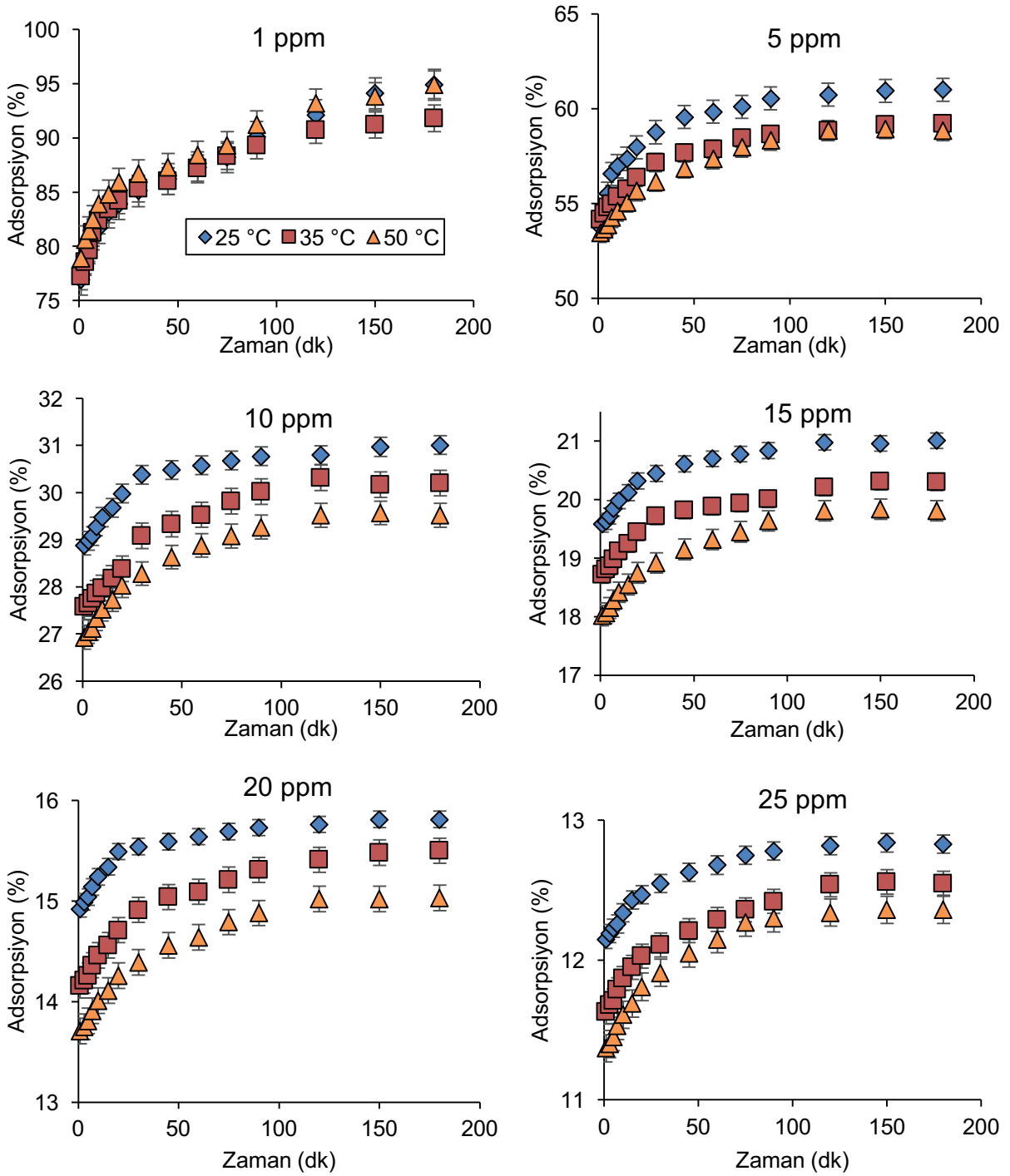
Sıcaklık diyagramları ilk dakikalardan son dakikalara kadar birbirleriyle paralel hareket etmiştir. Dengeye gelme profili incelendiğinde altmışıncı dakikadan sonra yavaş yavaş dengeye ulaşıldığı görülmektedir. MM derişim miktarları arttıkça adsorplanma yüzdeleri düşmektedir. Düşük derişimlerde %98'e ulaşan adsorpsiyon yüzdeleri gözlemlenirken, MM derişimleri arttıkça ancak %38'lere kadar düşen adsorpsiyon yüzdeleri gözlemlenmiştir.

3.2. Odun Atığı ile Adsorpsiyon Çalışmaları

Sivas Kangal linyitinde olduğu gibi Gebze MDF ve Yonga Levha Gazlaştırma tesisi ön çalışmasından alınan odun atığı ile de MM'nin farklı derişimlerinde adsorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Deneylerde dengeye ulaşma zamanı yaklaşık 20 dakika olmuştur. Artan MM derişimi sonucunda adsorplama verimi keskin şekilde düşmektedir. 25 ppm MM konsantrasyonunda

odun kömürü MM'nin ancak %10-13 kadarını giderebilmiştir. Sıcaklık artışı sonucunda linyit kömürünün aksine adsorpsiyon verimi düşmektedir (Şekil 6).

BET analiz sonuçları değerlendirildiğinde odun atığının linyit kömürüne göre daha iyi adsorbe etme özelliği olması gerekirken tam aksine linyit kömürünün adsorbe etme yeteneğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Boyarmaddenin bulunduğu



Şekil 6. Değişen konsantrasyonlardaki MM'nin odun atığı ile adsorpsiyonu

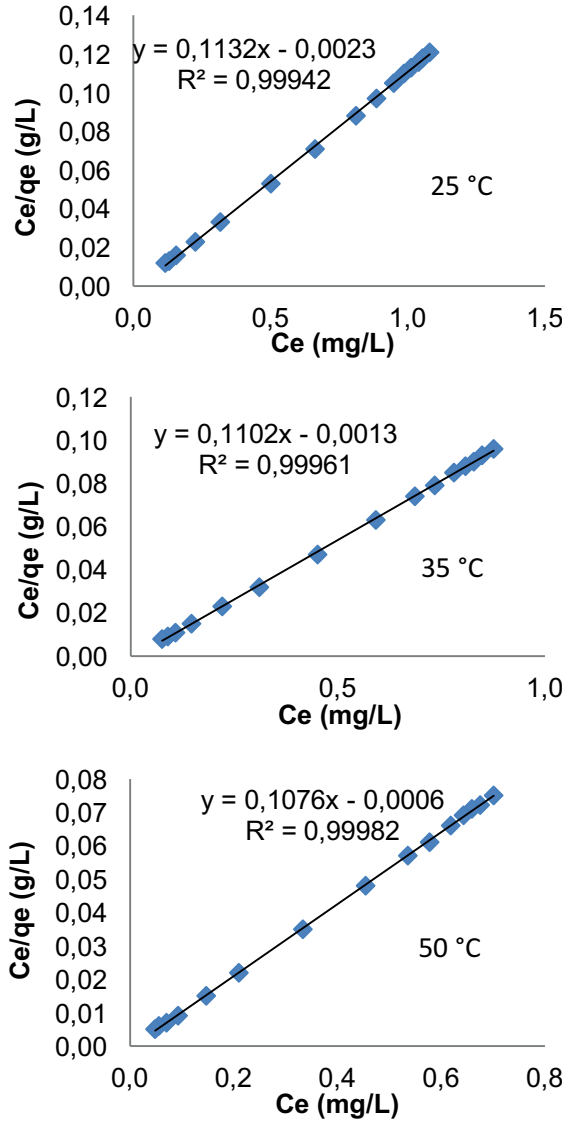
sulu ortamın yoğunluğu da göz önüne alındığında linyit kömürü odun atığından daha fazla bir yoğunluğa sahiptir.

Adsorpsiyon olayı gerçekleşirken en yüksek verim linyit kömüründen alınmıştır. Bu durumun odun atığının yoğunluk farkından ve hidrofobik yapısından olabileceği düşünülmektedir. Odun atığı hafif olmasından ötürü suyun yüzeyinde kalmakta ve adsorbe edilen boyar madde ile tam karışmamaktadır. Ayrıca SEM görüntülerinin incelenmesiyle odun atığının keskin köşelere ve yassı levha yapısına sahip olduğu buna karşın linyit kömürünün oval bir yapıda olduğu görülmüştür. Bu durumun da adsorpsiyon verimini etkileyebileceği düşünülmektedir.

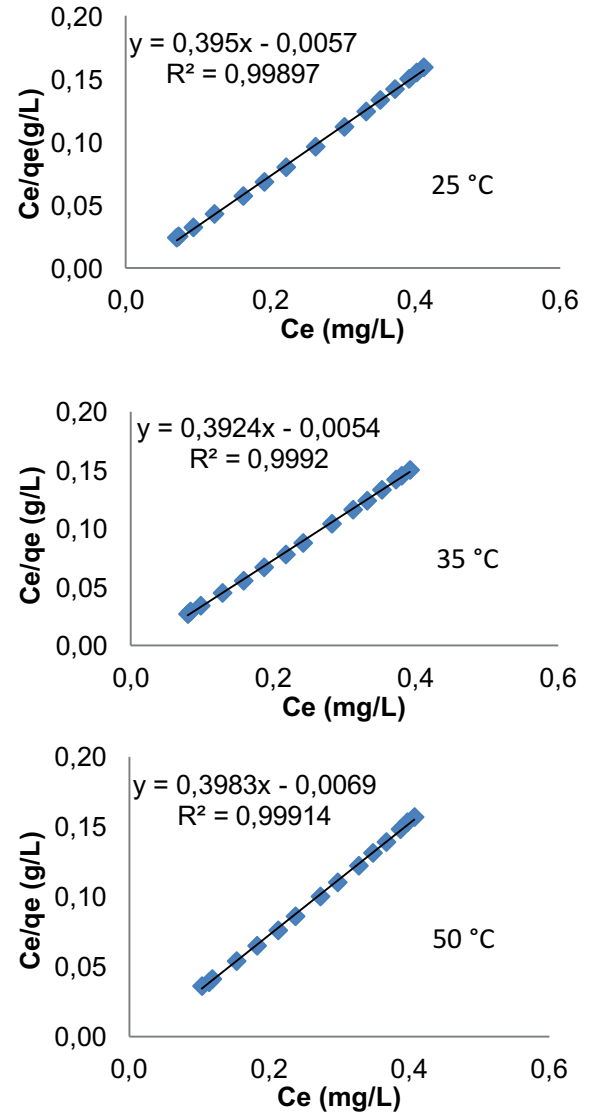
3.3. Langmuir İzotermeleri

Adsorpsiyon değerleri göz önüne alındığında linyit kömürü için 10 ppm ve odun atığı için ise 3 ppm MM konsantrasyonlarının adsorpsiyon için ideal derişimler olduğu belirlenmiştir. Bu konsantrasyonlarda değişik sıcaklıklar için Langmuir izotermeleri oluşturulmuştur (Şekil 7 ve Şekil 8).

Linyit kömürü için 25°C'de $q_0 = 8,84$ mg/g, 35°C'de $q_0 = 9,07$ mg/g ve 50°C'de $q_0 = 9,29$ mg/g olarak hesaplanmıştır. Üç sıcaklığın RL değeri 0 olarak bulunmuştur. Bu durumda linyit kömürünün Langmuir izotermine göre "Geri Dönüşümlü" olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. 10 ppm MM konsantrasyonunda linyit kömürü için Langmuir izotermeleri



Şekil 8. 3 ppm MM konsantrasyonunda odun atığı için Langmuir izotermeleri

Odun atığında 25°C'de $q_0 = 2,53$ mg/g, 35°C'de $q_0 = 2,55$ mg/g ve 50°C'de $q_0 = 2,51$ mg/g olarak bulunmuştur. Üç sıcaklığın RL değeri 0 olup odun atığı Langmuir izotermine göre "Geri Dönüşümlü" olarak belirlenmiştir.

SONUÇLAR

Çalışma kapsamında Sivas Kangal linyit kömürü ile Gebze MDF ve Yonga Levha Gazlaştırma tesisi çalışmalarından alınan odun atığı kullanılarak MM adsorpsiyon çalışmaları yapılmıştır. Adsorban olarak kullanılan malzemelerin BET, XRD, SEM, SEM-EDX, pH, elementel ve kısa analizleri yapılarak karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında yapılan adsorpsiyon testleri sonucunda aşağıdaki çıkarımlarda bulunulmuştur:

I. MM adsorpsiyonu için dengeye gelme süresi optimum verimlilikler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Linyit kömüründe bu süre 90 dakika olup aynı şekilde odun atığında bu süre 120 dakika olmuştur.

II. Adsorpsiyon çalışmalarında üç sıcaklıkta deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık bazında en verimli sonuçlar linyit kömüründe 50°C ve odun atığında 25°C'de elde edilmiştir. Linyit kömürünün sıcaklık artışı ile MM adsorbe etme yeteneği artarken odun atığı ise sıcaklık ile MM adsorbe etme yeteneğini kaybetmiştir.

III. Yapılan çalışmada MM derişiminin adsorpsiyon üzerinde önemli derecede etkili olduğu anlaşılmıştır. MM derişim miktarının artmasıyla adsorpsiyon verimi düşmüştür.

IV. Adsorban olarak kullanılan linyit kömürü ve odun atığı ile yapılan deneysel çalışmalarda sırasıyla 10 ppm ve 3 ppm MM derişimlerinde en yüksek adsorpsiyon yüzdeleri elde edilmiştir. Odun atığının hidrofobik yapısı ve düşük yoğunluğundan ötürü linyit kömüründen daha kötü performans gösterdiği görülmüştür.

V. Testler sonucunda optimum koşullarda 1 L çözeltide 1 g linyit kömürü adsorbanın 0,1 g MM ve 1 g odun atığı adsorbanın ise 0,03 g MM adsorbe edebileceği belirlenmiştir.

VI. Mevcut çalışmada linyit kömürü ve odun atığı malzemelere sadece boyut küçültme işlemi uygulanarak bu numuneler kullanılmıştır. Literatürde kömür ve biyokütle (nar kabuğu, kayısı çekirdeği, dışkılar vb.) kullanılarak aktif karbon üretildiği ve bu aktif karbon malzemelerin adsorpsiyon işlemlerinde kullanıldığı görülmektedir

(Kayman, 2009; Gündüz ve Bayrak, 2017; Tsai vd., 2019). Uçuculuğu alınmış veya aktifleştirilmiş kömür ve biyokütelerin yüzey alanları ve karbon oranları daha yüksek olduğundan maksimum adsorpsiyon kapasitelerinin doğal malzemelere kıyasla daha yüksek olacağı açıktır. Bu çalışmada ulaşılan adsorpsiyon kapasitelerinin aktif karbonlu çalışmalara kıyasla düşük olması doğal malzemelerin kullanılmasından dolayıdır. Deneyler çözeltinin doğal pH'ında yapılmıştır. Değişik pH değerlerinde deney yapılarak adsorpsiyon verimi artırılabilir.

VII. Atıkların değerlendirilmesi açısından ve çevresel sorunlar göz önüne alındığında ham linyit kömürünün ve odun atığının diğer adsorbanlarla kıyaslandığında daha ucuz olmaları ve kolayca elde edilmeleri nedeni ile adsorban olarak tercih kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje kodu: FYL-2018-990).

REFERANSLAR

Abak, H., 2008. Sulu Çözeltilerden Metilen Mavisinin Fındık Kabuğu Yüzeyine Adsorpsiyon ve Adsorpsiyon Kinetiği. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 81 s.

ASTM D7582-15, 2015, Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

Bayar, S., 2018. Metilen Mavisinin Doğal Kil Üzerine Adsorpsiyonu. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8 (2), 264-272.

Depci, T., Onal, Y., Erdogan, S., Canan, A. B., 2011. Adsorption and Kinetics of Hazardous Dye Rhodamine-B from Aqueous Solutions with Activated Carbon-Based Low-Rank Coal. Fresenius Environmental Bulletin, 20 (2), 303-309.

Gülensoy, H., Mahramanlıoğlu, M., 1998. Doğal ve Aktifleştirilmiş Kömürler Kullanarak Triklorasetik Asidin (Tca) Sulu Çözeltilerinden Uzaklaştırılması. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4 (1-2), 585-588.

Gündoğdu, A., 2010. Fabrika Çay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi. Karadeniz Teknik

- Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 198 s.
- Gündüz, F., Bayrak, B., 2017. Biosorption of Malachite Green from an Aqueous Solution Using Pomegranate Peel: Equilibrium Modelling, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Journal of Molecular Liquids*, 243, 790-798.
- Han, R., Wang, Y., Sun, Q., Wang, L., Song, J., He, X., Dou, C., 2010. Malachite Green Adsorption onto Natural Zeolite and Reuse by Microwave Irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 1056–1061.
- Hernández-Cocoletzi, H., Salinas, R. A., Águila-Almanza E., 2020. Natural Hydroxyapatite from Fishbone Waste for the Rapid Adsorption of Heavy Metals of Aqueous Effluent. *Environmental Technology & Innovation*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101109>.
- Ho, Y. S., McKay, G., 1998. Sorption of Dye from Aqueous Solution by Peat. *Chemical Engineering Journal*, 70 (2), 115-124.
- Kaur, B., Gupta, R. K., Bhunia, H., 2019. Chemically Activated Nanoporous Carbon Adsorbents From Waste Plastic for CO₂ Capture: Breakthrough Adsorption Study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 282, 146-158.
- Kayman, E., 2009. Sulu Çözeltilerdeki Kurşun İyonlarının Kestane Kabuğu ve Kayısı Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbonlar ile Adsorpsiyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77 s.
- Kocaer, F. O., Alkan, U., 2002. Boyarmadde İçeren Tekstil Atıksularının Arıtım Alternatifleri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7, 47-55.
- Korkmaz, A. A., Dağdeviren, Ç., Özdemir, Ç. S., 2014. Elbistan Uçucu Kül Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Uygulamaları. *Türkiye 19. Kömür Kongresi Bildirileri Kitabı*, Zonguldak, 303-308.
- Langmuir, I., 1916. The Constitution and Fundamental Properties of Solids and Liquids. Part I. Solids. *Journal of the American Chemical Society*, 38 (11), 2221-2295.
- Mahramanlioğlu, M., Arkan, B., 2002. Kömürden Elde Edilen Adsorbent ile Boyarmadde Uzaklaştırılması. *Türkiye 13. Kömür Kongresi Bildirileri Kitabı*, Zonguldak, 29-31.
- Mahramanlioğlu, M., Kızılcıklı, İ., Çınarlı, A., Özgen, Ö., 2002. Removal of Astrozon Red from Aqueous Solutions by the Adsorbents Produced from Lignite Coal. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 53-60.
- Murathan, A., Koçyiğit, H., 2013. Sulu Çözeltilerden Kadmiyum İyonlarının Dolgulu Yataklarda At Kestanesi ve Meşe Palamudu Kullanılarak Giderilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28 (2), 303-306.
- Santos, S. C., Vilar, V. J., Boaventura, R. A., 2008. Waste Metal Hydroxide Sludge As Adsorbent for a Reactive Dye. *Journal of Hazardous Materials*, 153 (3), 999-1008.
- Sriram, G., Kigga, M., Uthappa, U. T., Rego, R. M., Thendral, V., Kumeria, T., Jung, H. Y., Kurkuri, M. D., 2020. Naturally Available Diatomite and Their Surface Modification for the Removal of Hazardous Dye and Metal Ions: A Review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 282, 102198, 1-30.
- Şener, S., 2008. Use of Solid Wastes of the Soda Ash Plant as an Adsorbent for the Removal of Anionic Dyes: Equilibrium and Kinetic Studies. *Chemical Engineering Journal*, 138 (3), 207-214.
- Tahir, S., Rauf, N., 2006. Removal of a Cationic Dye From Aqueous Solutions by Adsorption onto Bentonite Clay. *Chemosphere*, 63, 1842–1848.
- Toumi, K. H., Benguerba, Y., Erto, A., Dotto, G. L., Khalfaoui, M., Tiar, C., Nacef, S., Amrane, A., 2018. Molecular Modeling of Cationic Dyes Adsorption on Agricultural Algerian Olive Cake Waste. *Journal of Molecular Liquids*, 264, 127-133.
- Tsai, W. T., Huang, P. C., Lin, Y. Q., 2019. Reusing Cow Manure for the Production of Activated Carbon Using Potassium Hydroxide (KOH) Activation Process and Its Liquid-Phase Adsorption Performance. *Processes*, 7, 737, 1-12.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Fersa Matbaacılık*, 112 s.
- Türkyılmaz, A., 2018. Sulu Çözeltilerden Nano Kil (Halosit) Yüzeyine Metilen Mavisi Adsorpsiyonu ve Kinetiği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (2), 413-424.



Orijinal Araştırma / Original Research

USABILITY OF CONTROL CHARTS TO MONITOR VARIATION OF QUALITY PARAMETERS IN COAL-FIRED THERMAL POWER PLANTS

KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLERDE KALİTE PARAMETRELERİNİN DEĞİŞİMİNİN İZLENMESİ İÇİN KONTROL GRAFİKLERİNİN KULLANILABİLİRLİĞİ

Ali Can Özdemir^{a,*}

^a Çukurova University, Engineering Faculty, Mining Engineering Department, Adana, TURKEY

Geliş Tarihi / Received : 16 Haziran / June 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 2 Ekim / October 2020

Keywords:

Statistical process control,
Control charts,
Calorific value,
Unit power.

ABSTRACT

During the production of electrical energy from coal-fired thermal power plants, calorific and unit power values are the most important indicators for evaluating the productivity of the process. These values are measured periodically, and the resulting measurements are monitored to detect root causes of variation that may occur in production process. As this application is currently performed by manual methods, the probability of obtaining incorrect results is quite high. This study aims to statistically analyze process control on the variation of quality parameters and detect root causes of unusual variations using Shewhart and cumulative sum control charts. For this purpose, the usability of these control charts was tested on Afşin-Elbistan B thermal power plant. As a result, these charts identified fluctuations in the efficiency of generating electrical energy and unusual variations in the process. Furthermore, it is recommended that these control charts could be developed and applied in similar type of process.

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Enerji verimliliği,
İstatistiksel proses kontrol,
Kontrol grafikleri,
Kalori değeri,
Ünite gücü.

Kömür yakıtlı termik santrallerden elektrik enerjisi üretimi sırasında prosesin verimliliğini değerlendirmek için kalorifik değer ve birim güç değeri en önemli parametrelerdir. Bu değerler periyodik olarak ölçülür ve ölçüm sonuçları üretim sürecinde ortaya çıkabilecek dalgalanmaların temel nedenlerini tespit etmek için izlenir. Bu uygulama mevcut durumda manuel yöntemlerle gerçekleştirildiğinden, hatalı sonuçların elde edilme olasılığı oldukça yüksektir. Bu çalışma, Shewhart ve kümülatif toplam kontrol grafiklerini kullanarak kalite parametrelerinin değişimi üzerindeki proses kontrolünü istatistiksel olarak analiz etmeyi ve olağandışı dalgalanmaların temel nedenlerini tespit etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla, bu kontrol grafiklerinin kullanılabilirliği Afşin-Elbistan B termik santrali üzerinde test edilmiştir. Sonuç olarak, bu grafikler kullanılarak elektrik enerjisi üretme verimliliğindeki dalgalanmaları ve süreçteki olağandışı değişimler belirlenmiştir. Ayrıca, bu kontrol grafiklerinin geliştirilmesi ve benzer prosesler için de uygulanması önerilmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: acozdemir@cu.edu.tr / <https://orcid.org/0000-0003-3064-4264>

INTRODUCTION

Monitoring the production process of coal-fired thermal power plants is crucial in many industries. To ensure stable production improving the performance of the process and reducing the variability in critical quality parameters are necessary. Statistical process control (SPC) method has been developed to accomplish this goal. The control charts are powerful, effective and important tools for the SPC method. These are generally used to detect unusual variation in the manufacturing process and to monitor the industrial processes (Guo and Dunne, 2006; Noorossana and Vaghefi, 2006; Montgomery, 2009; Aldosari et al., 2018).

Walter A. Shewhart has developed the concept of statistical control chart (Shewhart, 1924). Presently, this concept is known as the formal beginning of SPC (Montgomery, 2009). Recently, new statistical control charts have been developed along with the classical Shewhart charts. These are exponentially weighted moving average (EWMA), adaptive EWMA (AEWMA), cumulative sum (CUSUM), adaptive CUSUM (ACUSUM), double sampling (DS) and sequential probability ratio test (SPRT) control charts (Ou et al., 2012; Haq, 2018).

Control charts are defined as graphical representations of the change in time of the quality parameter that has been measured or calculated from a sample in the process (Montgomery, 2009). The main purpose of control charts is to monitor the process and determine the reasons affecting the process stability by visually defining the behavior of critical quality parameters (Yerel et al., 2007; Hachicha and Ghorbel, 2012; Abbas et al. 2013; Deniz and Umucu 2013; Alcantara et al., 2017). These charts contain three horizontal lines: upper control limit (UCL), control limit (CL) and lower control limit (LCL). CL is the line representing the average of the process, LCL and UCL, located below and above the average line, respectively, are the lines representing the control limits of the process. If a plotted statistic is between the control limits, then it indicates that the process is in control and no action is required. But if a plotted statistic is outside the control limits, then it indicates that the process is out of control. Therefore, root cause needs to be identified and corrective actions are required to be implemented to eliminate such disruptive events (Montgomery, 2009).

The control charts have been used in different fields in the literature. Duclos et al (Duclos et al., 2009), have used control charts to monitor the outcomes of thyroid surgery and stated that these are useful for identifying potential issues related to patient's safety. Bayat and Arslan (Bayat and Arslan, 2004), have observed a variation of chromite concentrates obtained from three different chromite mines using control charts. Freitas et al (Freitas et al., 2019), have statistically analyzed the consumption of water in toilet flush devices in a public university building using Shewhart, EWMA and combined Shewhart-EWMA control charts. Dubinin et al (Dubinin et al., 2018), have used control charts to identify problem zones in the mathematical preparation of students. Fu et al (Fu et al., 2017), have conducted a study on the usability of the Shewhart control chart as a major statistical tool to monitor the production of clean ash during coal preparation.

A case study is presented in this paper, and the results are evaluated to determine the effect of using statistical control charts on the performance of Afşin-Elbistan B, which consists of 4 units and has an installed power of 1440 MW. thermal power plant. Two critical quality parameters, calorific and unit power values, are measured in six shifts per day in this power plant. A data set was created using these measured values over 30 days. Then, the Shewhart and CUSUM control charts were plotted for both quality parameters and these charts are interpreted in detail.

1. STATISTICAL CONTROL CHARTS

1.1. Shewhart Control Chart

As the Shewhart control charts are easy to construct and interpret, these are prevalently used for monitoring processes in the industry. The \bar{x} and R (or s) charts are the most important and useful among them. These control charts are particularly effective in detecting a large change in the process (Montgomery, 2009; Aldosari et al., 2018; Ottenstreuer et al., 2019).

If x_i are the measurements of each sub-group, then the average of these measurements is calculated using Equation (1).

$$\bar{\bar{x}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (1)$$

Let \bar{x} be the average of each sample. Then, the best estimator of mean, or the process average, is the grand average, as shown in Equation (2). Thus, \bar{x} would be used as the center line on the chart.

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} \tag{2}$$

The formulas for constructing the control limits on the \bar{x} chart is given in Equations (3-5).

$$UCL_x = \bar{x} + A_2\bar{R} \tag{3}$$

$$CL_x = \bar{x} \tag{4}$$

$$LCL_x = \bar{x} - A_2\bar{R} \tag{5}$$

If x_i are the measurements of each sub-group, then the range of these measurements is the difference between the largest and smallest and calculated by subtracting the smallest from the largest (Equation (6)).

$$R = x_{max} - x_{min} \tag{6}$$

Let R_1, R_2, \dots, R_m are the ranges of m samples. The average range is given in Equation (7).

$$\bar{R} = \frac{R_1+R_2+\dots+R_m}{m} \tag{7}$$

The center line and control limits of the R chart are given in Equations (8-10).

$$UCL_R = D_4\bar{R} \tag{8}$$

$$CL_R = \bar{R} \tag{9}$$

$$LCL_R = D_3\bar{R} \tag{10}$$

where, A_2 , D_3 and D_4 are the constants determined from factors for constructing variable control charts according to various sample sizes (Montgomery, 2009).

1.2. Cusum Control Chart

Page (1954) introduced the CUSUM control chart for monitoring the process dispersion. This control chart directly incorporates all the information in the sequence of sample values by plotting cumulative sums of the deviations of the sample values from a target value (Montgomery, 2009). The CUSUM control chart is more successful than Shewhart chart in detecting sudden, small and persistent changes and can be used as an alternative statistical tool. Many researchers have studied about the use of this chart (Page, 1961), Ewan (Ewan, 1963), Lucas (Lucas, 1976), Gan

(Gan, 1991), Hawkins (Hawkins, 1981; Hawkins, 1993), Woodall and Adams (Woodall and Adams, 1993)

Let assume the samples of size $n \geq 1$, and μ_0 is the average of the j_{th} sample. If μ_0 is the target for the process mean, then the CUSUM control chart parameters are calculated using Equation (11).

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0) \tag{11}$$

If μ_0 is accepted as the mean of the distribution (μ_0), the CUSUM chart is plotted by using Equation (12).

$$C_i = (x_i - \mu_0) + C_{i-1} \tag{12}$$

where, μ_0 is generally accepted as the mean of the distribution (Montgomery, 2009).

2. RESULT AND DISCUSSION

In this study, as the thermal power plant, in which the data was obtained, worked six shifts per day, the number of sub-groups was determined to be 6. Also, the case study was conducted on two different parameters: the calorific and unit power values. The \bar{x} and R values of these parameters were calculated using Equations (1) and (6). The obtained results are shown in Table 1.

The constants used for calculating control limits were taken from factors for constructing variable control charts. It has been considered the values $n = 6$ as a sub-group size, $A_2 = 0.483$, $D_3 = 0$ and $D_4 = 2.004$ (Montgomery, 2009).

For calorific value;

$$\bar{x} = \frac{27843.8}{31} = 898.2$$

$$\bar{R} = \frac{3626.8}{31} = 117.0$$

$$UCL_x = 898.2 + 0.483 * 117.0 = 954.7$$

$$CL_x = 898.2$$

$$LCL_x = 898.2 - 0.483 * 117.0 = 841.7$$

$$UCL_R = 2.004 * 117.0 = 234.5$$

$$CL_R = 117.0$$

$$LCL_R = 0 * 117.0 = 0$$

The \bar{x} and R control charts were plotted for the

calorific value and these charts are given in Figures 1-2.

Table 1. The \bar{x} and R values for Shewhart control charts

| Days | Calorific Value (kcal) | | Unit Power (MWh) | |
|------|------------------------|-------|------------------|-------|
| | \bar{x} | R | \bar{x} | R |
| 1 | 876.2 | 88.4 | 237.3 | 19.9 |
| 2 | 906.0 | 82.8 | 243.9 | 5.9 |
| 3 | 931.9 | 105.0 | 238.5 | 9.5 |
| 4 | 886.6 | 91.9 | 194.1 | 143.1 |
| 5 | 882.4 | 76.7 | 223.2 | 18.5 |
| 6 | 887.0 | 66.3 | 250.1 | 39.5 |
| 7 | 859.0 | 85.7 | 197.4 | 257.7 |
| 8 | 860.7 | 77.6 | 205.2 | 196.8 |
| 9 | 897.4 | 22.9 | 253.9 | 1.6 |
| 10 | 912.3 | 90.5 | 230.9 | 56.8 |
| 11 | 893.0 | 104.5 | 211.8 | 35.4 |
| 12 | 863.0 | 113.1 | 231.7 | 28.8 |
| 13 | 907.1 | 176.2 | 251.9 | 3.8 |
| 14 | 1015.4 | 136.5 | 236.4 | 38.0 |
| 15 | 722.4 | 396.5 | 178.9 | 165.4 |
| 16 | 852.0 | 177.1 | 227.9 | 82.8 |
| 17 | 860.4 | 72.2 | 207.2 | 229.9 |
| 18 | 846.2 | 183.8 | 236.6 | 60.4 |
| 19 | 941.6 | 102.5 | 249.0 | 26.9 |
| 20 | 893.9 | 68.7 | 247.1 | 21.3 |
| 21 | 880.5 | 51.9 | 249.3 | 16.8 |
| 22 | 944.8 | 40.9 | 258.5 | 14.3 |
| 23 | 954.6 | 83.7 | 263.0 | 3.5 |
| 24 | 867.8 | 300.4 | 241.5 | 82.7 |
| 25 | 933.4 | 65.3 | 259.8 | 6.6 |
| 26 | 927.2 | 375.1 | 232.0 | 99.8 |
| 27 | 936.7 | 75.0 | 225.7 | 117.0 |
| 28 | 954.5 | 83.9 | 259.3 | 12.8 |
| 29 | 938.6 | 129.1 | 214.4 | 121.9 |
| 30 | 926.4 | 49.9 | 252.9 | 38.0 |
| 31 | 884.8 | 52.9 | 248.9 | 21.8 |

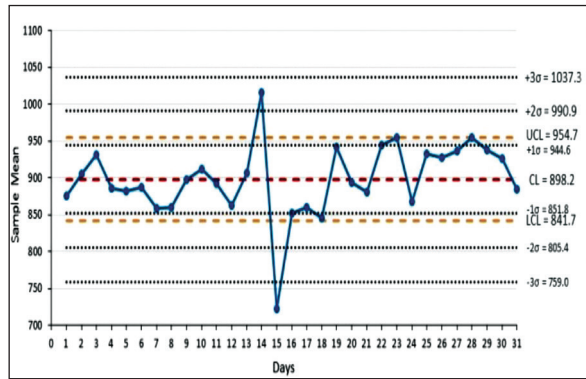


Figure 1. \bar{x} Control chart for the calorific value

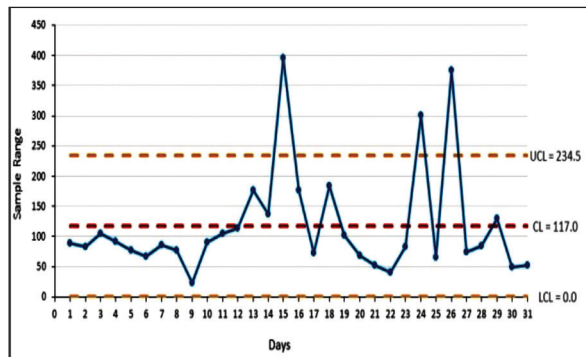


Figure 2. R Control chart for the calorific value

From Figure 1, it is observed that the process is in control except for 14th and 15th days. The calorific value was highest on the 14th day and lowest on the 15th day this fluctuation caused the process to go out of control. On the 15th day and between 23th and 27th days, it is appeared that the sample range was very high during the process (Figure 2). Except for these, very little fluctuation was detected in the process during the period. It is determined that this high fluctuation was caused by a problem in the production or in the blending stages.

For unit power;

$$\bar{x} = \frac{7257.9}{31} = 234.1$$

$$\bar{R} = \frac{1977.0}{31} = 63.8$$

$$UCL_x = 234.1 + 0.483 * 63.8 = 264.9$$

$$CL_x = 234.1$$

$$LCL_x = 234.1 - 0.483 * 63.8 = 203.3$$

$$UCL_R = 2.004 * 63.8 = 127.8$$

$$CL_R = 63.8$$

$$LCL_R = 0 * 63.8 = 0$$

The \bar{x} and R control charts were plotted for the unit power value and these charts are given in Figures 3 and 4, respectively.

When Figure 3 is examined, it is observed that three points (4, 7 and 15) in the process are out of control. Although there are periodic fluctuations for other points, the process is in control. At Figure 4, it is seen that five points (4, 7, 8, 15 and 17) in the process are out of control and the fluctuations in other points in control are quite high. It is understood from these control charts that the process is highly variable. Therefore, the reasons for this variability in the process should be identified and corrective measures should be taken to reduce them. The quality parameters for CUSUM control charts are calculated using Equation (12), and the obtained results are shown in Table 2.

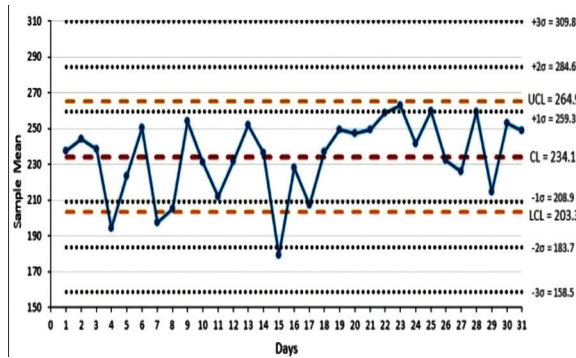


Figure 3. The control chart for the unit power

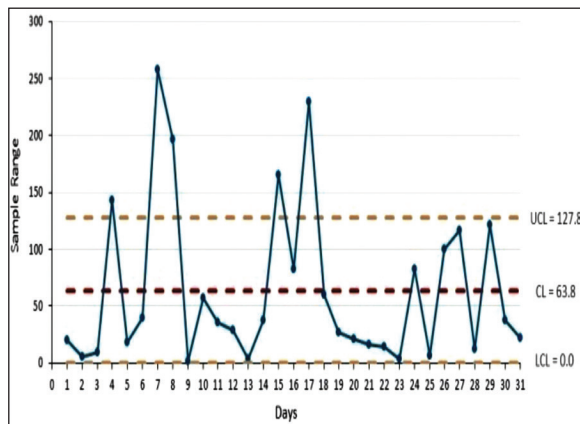


Figure 4. The R control chart for the unit power

Table 2. The calculated values for CUSUM control charts

| Days | Calorific Value (kcal) | | | Unit Power (MWh) | | |
|------|------------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
| | Mean | Upper CUSUM | Lower CUSUM | Mean | Upper CUSUM | Lower CUSUM |
| 1 | 876.2 | -22.2 | -22.2 | 237.3 | 3.2 | 3.2 |
| 2 | 906.0 | 7.7 | -14.5 | 243.9 | 9.7 | 12.9 |
| 3 | 931.9 | 33.5 | 19.0 | 238.5 | 4.4 | 17.3 |
| 4 | 886.6 | -11.8 | 7.3 | 194.1 | -40.0 | -22.7 |
| 5 | 882.4 | -16.0 | -8.7 | 223.2 | -10.9 | -33.7 |
| 6 | 887.0 | -11.3 | -20.1 | 250.1 | 15.9 | -17.7 |
| 7 | 859.0 | -39.4 | -59.5 | 197.4 | -36.7 | -54.4 |
| 8 | 860.7 | -37.7 | -97.1 | 205.2 | -28.9 | -83.4 |
| 9 | 897.4 | -0.9 | -98.1 | 253.9 | 19.7 | -63.7 |
| 10 | 912.3 | 14.0 | -84.1 | 230.9 | -3.3 | -66.9 |
| 11 | 893.0 | -5.4 | -89.5 | 211.8 | -22.4 | -89.3 |
| 12 | 863.0 | -35.4 | -124.9 | 231.7 | -2.4 | -91.7 |
| 13 | 907.1 | 8.7 | -116.1 | 251.9 | 17.7 | -73.9 |
| 14 | 1015.4 | 117.0 | 0.9 | 236.4 | 2.2 | -71.7 |
| 15 | 722.4 | -176.0 | -175.1 | 178.9 | -55.2 | -127.0 |
| 16 | 852.0 | -46.4 | -221.5 | 227.9 | -6.2 | -133.2 |
| 17 | 860.4 | -38.0 | -259.4 | 207.2 | -27.0 | -160.2 |
| 18 | 846.2 | -52.2 | -311.6 | 236.6 | 2.4 | -157.7 |
| 19 | 941.6 | 43.2 | -268.4 | 249.0 | 14.9 | -142.9 |
| 20 | 893.9 | -4.5 | -272.9 | 247.1 | 12.9 | -129.9 |
| 21 | 880.5 | -17.9 | -290.7 | 249.3 | 15.1 | -114.8 |
| 22 | 944.8 | 46.4 | -244.3 | 258.5 | 24.4 | -90.4 |
| 23 | 954.6 | 56.3 | -188.0 | 263.0 | 28.9 | -61.5 |
| 24 | 867.8 | -30.5 | -218.6 | 241.5 | 7.4 | -54.1 |
| 25 | 933.4 | 35.0 | -183.6 | 259.8 | 25.7 | -28.5 |
| 26 | 927.2 | 28.9 | -154.7 | 232.0 | -2.1 | -30.6 |
| 27 | 936.7 | 38.4 | -116.4 | 225.7 | -8.4 | -39.0 |
| 28 | 959.9 | 61.6 | -54.8 | 259.3 | 25.2 | -13.7 |
| 29 | 938.6 | 40.2 | -14.5 | 214.4 | -19.7 | -33.5 |
| 30 | 926.4 | 28.1 | 13.5 | 252.9 | 18.7 | -14.7 |
| 31 | 884.8 | -13.5 | 0.0 | 248.9 | 14.7 | 0.0 |

The CUSUM control charts were plotted for the calorific value and unit power value and these charts are given in Figures 5 and 6, respectively.

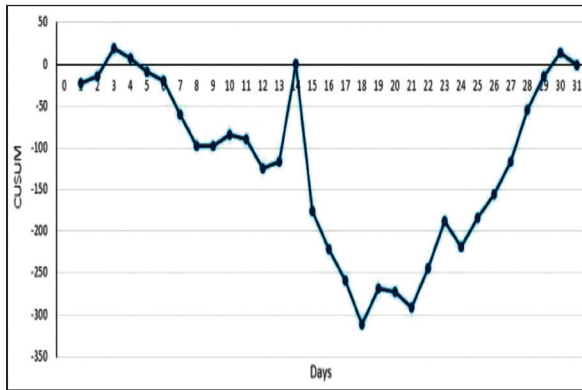


Figure 5. The Cusum control chart for the calorific value



Figure 6. The Cusum control chart for the unit power

If the Figures 5 and 6 were evaluated together, the same change was observed in both the graphs. A negative trend up to point 17 and a positive trend after that point are observed. These trends were not observed in Shewhart chart.

CONCLUSION

In this study, the usability of statistical control charts for monitoring the calorific and unit power values in the production of electrical energy from the coal-fired thermal plant was investigated. This process was monitored for a month using Shewhart and CUSUM control charts. It is concluded that these charts proved very effective for detecting the unusual variation of productivity in the production of electrical energy. These charts are very useful to determine whether the process is in control or not. Furthermore, it is recommended using different combined structures of control charts for the higher level of productivity during the production of electrical energy.

REFERENCES

- Abbas, N., Zafar, R. F., Riaz, M., Hussain, Z., 2013. Progressive Mean Control Chart for Monitoring Process Location Parameter. *Quality and Reliability Engineering International* 29(3): 357-367.
- Alcantara, M. S., Grisotti, G., Tavares, M. H. F., Gomes, S. D., 2017. Anaerobic Digestion Stability Test by Shewhart Control Chart. *Engenharia Agricola* 37(3): 618-626.
- Aldosari, M. S., Aslam, M., Khan, N., Jun, C. H., 2018. Design of a New Variable Shewhart Control Chart Using Multiple Dependent State Repetitive Sampling. *Symmetry-Basel* 10(11): 9.
- Bayat, O., Arslan, V., 2004. Statistical Analysis In Turkish Chromite Mining. *Scandinavian Journal of Metallurgy* 33(6): 322-327.
- Deniz, V., Umucu, Y., 2013. Application of Statistical Process Control for Coal Particle Size. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 35(14): 1306-1315.
- Dubin, N. N., Kalinin, V. V., Kokovin, A. V., Guseva, O. S., Lapshina, S. N., Dolganov, A., Parusheva, S. S., Aip, 2018. Shewhart's Control Charts in the Education Quality Management System. *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics*. Melville, Amer Inst Physics. 1978.
- Duclos, A., Touzet, S., Soardo, P., Colin, C., Peix, J. L., Lifante, J. C., 2009. Quality Monitoring In Thyroid Surgery Using the Shewhart Control Chart. *British Journal of Surgery* 96(2): 171-174.
- Ewan, W. D., 1963. When and How to Use Cu-Sum Charts. *Technometrics* 5(1): 1-22.
- Freitas, L. L. G., Henning, E., Kalbusch, A., Konrath, A. C., Walter, O., 2019. Analysis of Water Consumption in Toilets Employing Shewhart, EWMA, and Shewhart-Ewma Combined Control Charts. *Journal of Cleaner Production* 233: 1146-1157.
- Fu, X., Wang, R. F., Dong, Z. Y., 2017. Application of a Shewhart Control Chart to Monitor Clean Ash During Coal Preparation. *International Journal of Mineral Processing* 158: 45-54.
- Gan, F. F., 1991. An Optimal Design of CUSUM Quality Control Charts. *Journal of Quality Technology* 23(4): 279-286.
- Guo, R., Dunne, T., 2006. Grey Predictive Process Control Charts. *Communications in Statistics - Theory and Methods* 35(10): 1857-1868.

- Hachicha, W., Ghorbel, A., 2012. A Survey Of Control-Chart Pattern-Recognition Literature (1991-2010) Based on a New Conceptual Classification Scheme. *Computers & Industrial Engineering* 63(1): 204-222.
- Haq, A., 2018. A New Adaptive EWMA Control Chart For Monitoring the Process Dispersion. *Quality and Reliability Engineering International* 34(5): 846-857.
- Hawkins, D. M., 1981. A Cusum for a Scale Parameter. *Journal of Quality Technology* 13(4): 228-231.
- Hawkins, D. M., 1993. Cumulative Sum Control Charting: an Underutilized SPC Tool. *Quality Engineering* 5(3): 463-477.
- Lucas, J. M., 1976. The Design and Use of V-Mask Control Schemes. *Journal of Quality Technology* 8(1): 1-12.
- Montgomery, D. C., 2009. *Introduction to Statistical Quality Control*. USA, John Wiley & Sons Inc.
- Noorossana, R., Vaghefi, S. J. M., 2006. Effect of Autocorrelation on Performance of the Mcusum Control Chart. *Quality and Reliability Engineering International* 22(2): 191-197.
- Ottenstreuer, S., Weiss, C. H., Knoth, S., 2019. A Combined Shewhart-CUSUM Chart With Switching Limit. *Quality Engineering* 31(2): 255-268.
- Ou, Y. J., Wu, Z., Tsung, F., 2012. A Comparison Study of Effectiveness And Robustness of Control Charts for Monitoring Process Mean. *International Journal of Production Economics* 135(1): 479-490.
- Page, E. S., 1954. Continuous Inspection Schemes. *Biometrika* 41(1/2): 100-115.
- Page, E. S., 1961. Cumulative Sum Charts. *Technometrics* 3(1): 1-9.
- Shewhart, W. A., 1924. Some Applications of Statistical Methods to the Analysis of Physical and Engineering Data. *Bell System Technical Journal* 3(1): 43-87.
- Woodall, W. H., Adams, B. M., 1993. The Statistical Design of Cusum Charts. *Quality Engineering* 5(4): 559-570.
- Yerel, S., Ankara, H., Konuk, A., Ozdag, H., 2007. Preventive Maintenance Policy Supported By a Quality Control Chart and Kolmogorov-Smirnov Tests: Emet Colemanite Mineral Processing Plant Turkey. *Mining, Metallurgy & Exploration* 24(3): 152-156.



Orijinal Araştırma / Original Research

BAZI KAYAÇ ÖZELLİKLERİNDEN FARKLI DERİNLİKLERDEKİ KAYA TUZU ÖRNEKLERİNİN ELASTİSİTE MODÜLÜNÜN TAHMİNİ

PREDICTING THE MODULUS OF ELASTICITY OF ROCK SALT SAMPLES AT DIFFERENT DEPTHS FROM SOME ROCK PROPERTIES

Fatih Bayram^{a,*}, İlker Bektaşoğlu^{b,**}

^a Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

^b BOTAŞ Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 27 Aralık / December 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 10 Ağustos / August 2020

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Kaya tuzu,
 Elastisite modülü,
 Kayaç özellikleri,
 İstatistiksel model.

Elastisite modülü, kaya mühendisliği yapılarının tasarımlarında ve analizlerinde temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Tuz domları içerisinde yapılacak olan yeraltı açıklıklarının tasarımı ve yapımı kaya mühendisliği açısından önemlidir. Bu açıklıkların tasarımında ve yapımı sırasında uygulanan çözeltili madencilik parametrelerinin ayarlanması için kayaç özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Tuz Gölü Havzasından alınan tuz karotlarına ait bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin elastisite modülü ile ilişkileri incelenmiştir. Elastisite modülünün bazı kayaç özelliklerinden tahminine yönelik istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda, tuz örneklerinin derinlik farklılığı temel alınarak elastisite modülü tahmin modelleri geliştirilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen istatistiksel modellerin tuz örneklerinin elastisite modüllerinin genel ve derinliğe bağlı tahmininde oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bu istatistiksel modellerle, Tuz Gölü Havzasında yapılacak yeraltı açıklıklarının tasarımında ve yapımında gerekli olan elastisite modülü değerlerinin belirlenmesinde yüksek güvenilirlikte tahmini bir yaklaşım sağlanmıştır.

ABSTRACT

Keywords:

Rock salt,
 Modulus of elasticity,
 Rock properties,
 Statistical model.

The modulus of elasticity is used as the basic input parameter in the design and analysis of rock engineering structure. The design and construction of underground caverns in salt domes is important for rock engineering. It is necessary to determine the rock properties in order to adjust the solution mining parameters applied during the design and construction of underground caverns. In this study, the relationships between some physical, mechanical and physicochemical properties of salt core samples taken from Tuz Gölü Basin and the modulus of elasticity were investigated. Statistical studies were carried out to predict the modulus of elasticity from some rock properties. At the same time, prediction models for modulus of elasticity were developed based on the depth difference of salt samples. As a result, the developed statistical models are very successful in the general and depth dependent prediction of the modulus of elasticity. A predicted approach with high reliability in determining the modulus of elasticity required in the design and construction of underground caverns in Tuz Gölü Basin is provided with these statistical models.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: bayramfatih@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8510-7936>

** ibektasoglu@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-7905-1112>

GİRİŞ

Yeraltı tuz domları, depo amaçlı açılacak açıklıklar özellikle yeraltı doğal gaz depoları için oldukça uygun formasyonlardır. Geçirgenliklerinin düşük olması, açılan açıklıkların uzun süre tahkimatsız duraylıklarını sürdürebilmesi, çözelti madenciliğiyle istenilen boyut ve şekillerde açıklıkların oluşturulabilmesi gibi özellikleri tuz domlarının depo amaçlı kullanım olanaklarını artırmaktadır.

Kaya tuzu içerisinde depo amaçlı açılacak olan açıklıkların tasarımında birçok parametre (çözünme hızı, çözünme açısı, örtü gazı derinliği, açıklık sıcaklığı, sondaj dizgi seviyeleri, çözünmeyen madde miktarı, tuzun fiziksel ve mekanik özellikleri vb.) etkilidir. Bu tür parametreler, açıklık şeklinin tasarlandığı modelleme programlarında (WinUbro. Net, PCL 5 vb.) temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Özellikle kaya tuzunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yapılacak olan eritme işlemlerinde açıklık şeklinin tasarımında önem arz etmektedir (Bektaşoğlu, 2016).

Literatürde kaya tuzunun kayaç özellikleriyle ilgili oldukça fazla çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar içerisinde yeraltı tuz domlarına yönelik çalışmalar incelendiğinde, bazı araştırmacıların kaya tuzunun zamana bağlı deformasyonu, sünme ve bozulma davranışları üzerine çalışmalar yaptıkları gözlenmektedir (Brouard vd., 1997; Arıkan ve Şenyur, 2008; Wang vd., 2010; Moghadam vd., 2013; Jianqiang vd., 2013; Passaris vd., 2015). Literatürde yeraltı tuz açıklıklarının mühendislik açısından tasarımı ve jeomekanik açıdan duraylılığı üzerine yapılan çalışmalara da rastlanılmaktadır (Vouille ve Tassel, 1979; Özarslan vd., 2007; Xiangzhen vd., 2013; Wijermars, 2013; Minkley vd., 2014; Zapf, 2014; Rouabhi vd., 2017; Qiqi vd., 2018; Wang vd., 2018).

Bu çalışmaların yanında, DeVries vd. (2002) tuz numuneleri üzerinde yaptıkları çeşitli laboratuvar deneyleriyle yeraltı doğal gaz depolarının duraylılığını doğru şekilde belirlemek için sahaya özgü sünme, deformasyon ve iyileştirme parametreleriyle bir model oluşturmaya çalışmışlardır. Özkan ve Düzyol (2004), kaya tuzu üzerinde bazı mühendislik tasarım parametreleri belirlemişlerdir. Liang vd. (2007), tabakalı tuz yataklarında tek eksenli ve üç eksenli mekanik

özelliklerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapmışlardır. Liang vd. (2012), farklı tuz yataklarının mekanik davranışlarını araştırmak için tek eksenli basma dayanımı deneyleri çevrimsel yükleme altında gerçekleştirmişlerdir. Xing vd. (2014), çeşitli üç eksenli deneyleriyle kaya tuzunun mekanik ve hidrolik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Singh vd. (2017), kaya tuzunun gerilim-deformasyon davranışının tahminine yönelik reolojik bir model önermişlerdir.

Yukarıda belirtilen çalışmalar incelendiğinde, kaya tuzunun elastisite modülünün, bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özellikleriyle ilişkilendirildiği ve kaya mekaniği deneyleri düşünüldüğünde, belirlenmesi özel donanım gerektiren, zaman alıcı ve hassas olan elastisite modülünün tahminine yönelik literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu doğrultuda, fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklere bağlı olarak, tuz domunun elastisite modülünün farklı derinlikler için tahminine yönelik istatistiksel modellerin geliştirilmesi bu çalışma amacı olarak seçilmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışma, temel olarak iki aşamadan oluşmuştur. Birinci aşama, tuz domuyla ilgili gerekli fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal deneylerin takibi ve sonuçların elde edilmesi çalışmalarıdır. İkinci aşama ise, elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve tuz domuna ait bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin elastisite modülü ile ilişkilerinin incelenerek elde edilen sonuçların istatistiksel olarak irdelenmesidir.

1.1. Tuz Domunun Bazı Fiziksel, Mekanik ve Fizikokimyasal Özellikleri

Tuz Gölü Havzasında yeraltı doğal gaz depolama projesi için yapılan sondaj çalışmalarında tuz formasyonu içerisinde üç farklı derinlikten (1150-1168 m, 1340-1358 m, 1440-1458 m) her biri 18 m olan karotlar alınmıştır. Karotların alındığı derinlikler, yeraltı açıklıklarının tasarımı sırasında belirlenen depo oluşturma fazlarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. Tuz formasyonu içerisinde üç farklı derinlikten alınan numuneler üzerinde bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerin

belirlenmesine yönelik çeşitli deneyler depolama projesi kapsamında anlaşmalı laboratuvarlar tarafından gerçekleştirilmiştir (Bektaşoğlu, 2016). Bu kapsamda yapılan ve çalışmada kullanılan deneyler aşağıda sıralanmıştır:

- Birim hacim kütlesi (UVM)
- Nem içeriği (MC)
- Tek eksenli basma dayanımı (UCS)
- Çekme dayanımı (TS)
- Kohezyon (c)
- Deneysel yatay çözünme hızı (K_H)
- Deneysel dikey çözünme hızı (K_V)

Yapılan deneysel çalışmalarda ISRM (1981) standartları kullanılmıştır. Bu kapsamda kullanılan çapları 90-100 mm arasında değişen karot numunelerinin boy/çap oranları, tek eksenli basma dayanımı, elastisite modülü ve kohezyonun belirlendiği üç eksenli basma dayanımı deneyleri için 2, çekme dayanımı deneyleri için 0,5 olacak şekilde düzenlenmiştir. Tuz domuna ait yukarıda belirtilen fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özellikler Çizelge 1’de verilmiştir.

1.2. Elastisite Modülü (E)

Elastisite modülü, eksenel gerilimin, gerilim değişiminin neden olduğu eksenel birim deformasyon artışına oranıdır. Dolayısıyla elastisite modülünün belirlenebilmesi için, tek eksenli yükleme koşulları altında oluşan eksenel birim deformasyonun ölçülmesi gerekmektedir.

Elastisite modülü kaya mühendisliği tasarımlarında ve analizlerinde temel girdi parametresi olarak kullanılmaktadır. Kayaçların bu parametresinin belirlenebilmesi için kalitesi oldukça yüksek karot numunelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı durumlarda (yüksek kil içeriği, iri tane boyutu, yüksek porozite vb.) bu özellikte karot numunesi elde etmek mümkün olmamaktadır. Deney düzeneğinin ayrıntılı ve yapılacak deneyin de hassas ve dikkat isteyen bir deney olması nedeniyle kaya mekaniğinde elastisite modülü dolaylı olarak da belirlenebilmektedir.

Çalışma kapsamında belirlenen tuz domuna ait elastisite modülü (E) değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Çalışma kapsamında kullanılan tuz domuna ait özellikler (Bektaşoğlu, 2016)

| Karot no | Ortalama karot derinliği (ACD) (m) | UVM (t/m^3) | MC (%) | UCS (MPa) | TS (MPa) | c (MPa) | K_H (m/h) | K_V (m/h) | E (MPa) |
|----------|------------------------------------|-----------------|--------|-----------|----------|---------|-------------|-------------|---------|
| K1-I | 1159 | 2,178 | 0,086 | 19,650 | 1,620 | 8,520 | 0,1364 | 0,0641 | 6039 |
| K1-II | 1349 | 2,148 | 0,094 | 21,400 | 1,480 | 15,850 | 0,0600 | 0,0636 | 4968 |
| K1-III | 1449 | 2,160 | 0,100 | 28,200 | 1,750 | 16,250 | 0,0596 | 0,0681 | 5594 |
| K2-I | 1159 | 2,121 | 0,083 | 14,600 | 1,945 | 9,750 | 0,0647 | 0,0794 | 4181 |
| K2-II | 1349 | 2,216 | 0,124 | 29,570 | 1,760 | 9,090 | 0,0582 | 0,0602 | 6230 |
| K2-III | 1449 | 2,178 | 0,090 | 30,270 | 2,300 | 16,250 | 0,0600 | 0,0642 | 5624 |
| K3-I | 1159 | 2,170 | 0,086 | 23,100 | 1,695 | 9,710 | 0,0866 | 0,0709 | 3934 |
| K3-II | 1349 | 2,107 | 0,086 | 28,000 | 1,650 | 8,780 | 0,0809 | 0,0946 | 3253 |
| K3-III | 1449 | 2,134 | 0,096 | 31,400 | 1,715 | 22,510 | 0,0630 | 0,0590 | 6360 |

2. İSTATİSTİKSEL ÇALIŞMALAR

Birçok bilimsel çalışmada en önemli nokta, çalışma sonucunda elde edilen önemli çıktıların (yanıtların) kullanılabilir seviyede açıklanmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, genellikle çıktıların birbirleri ile ilişkilerinin incelenmesinde basit veya çoklu doğrusal regresyon modelleri kullanılmaktadır. Regresyon analizinde kurulan model, bağımlı (açıklanan) değişken ve bağımsız (açıklayan) değişkenlerden oluşan bir modeldir. Bu modelde, bağımlı değişkendeki farklılık, bağımsız değişkenler ile ortaya konmaya çalışılır. Bu konuda en önemli parametre olan belirtme katsayısı (R^2), bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranıdır. Regresyon katsayısı (R) ise, bağımsız değişkendeki artışın bağımlı değişken üzerinde yapacağı değişim miktarıdır. Basit veya çoklu doğrusal regresyon modellerinin oluşturulmasında ilk aşama, modeli oluşturan değişkenlerin ve katsayılarının belirlenmesidir. Daha sonra model geçerliliği varyans analizi ile istatistiksel olarak test edilmelidir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen istatistiksel işlemler Minitab isimli istatistiksel analiz programıyla iki aşamada yapılmıştır. İlk aşamada elde edilen verilerle genel bir elastisite modülü tahmin modeli türetilmiş, ikinci aşamada ise, ortalama karot derinlikleri dikkate alınarak elastisite modülü tahmin modelleri türetilmiştir. Yapılan istatistiksel çalışmalara bağımlı değişkenin (elastisite modülü), bağımsız değişkenlerin (birim hacim kütlesi, nem içeriği, tek eksenli basma ve çekme dayanımları, malzeme kohezyonu, deneysel yatay ve dikey çözünme hızları) ve kategorik değişkenin (ortalama karot derinliği) temel istatistiklerinin incelenmesiyle başlanmıştır. Modelde kullanılacak parametrelerin temel istatistikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Temel istatistik çizelgesinde, parametreler için önemli tanımlayıcı istatistiklerin (ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değerler vb.) verildiği görülmektedir. Özellikle Skewness (çarpıklık) ve Kurtosis (basıklık) katsayıları değerlendirildiğinde, verilerin normal dağılım gösterdiği belirtilebilir. Verilerin çarpıklık katsayıları, normal dağılım için kabul edilen değerler (± 3) arasındadır.

Temel istatistik incelemesinin ardından tuzun bazı fiziksel, mekanik ve fizikokimyasal özelliklerinden elastisite modülünün tahminine yönelik yapılan

istatistiksel çalışmalarda, regresyon denkleminde kullanılacak tuz parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Elastisite modülünün tahmininde kullanılacak çoklu doğrusal regresyon modelinin geliştirilmesi için, ilk olarak en iyi değişkenlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Bu seçim, en iyi alt kümeler regresyonu (best subsets regression) ile yapılmıştır. En iyi alt kümeler regresyonu, bağımsız değişkenleri kullanarak en uygun regresyon modelleri tanımlayan otomatik bir işlemdir. Bu işlemde temel yaklaşım, istatistiksel kıstasları tamamen sağlayacak en küçük bağımsız değişken alt kümesini seçmektir. Bütün değişkenlerden oluşan setin yerine, alt küme setini kullanmanın nedeni, daha az bağımsız değişken kullanarak bağımlı değişkenin daha küçük değişimlerle (daha düşük varyanslarla) tahmin edilebileceğidir.

En iyi alt kümeler regresyonunda kurulacak modelleri karşılaştırmada en çok kullanılan ölçütler, düzeltilmiş belirtme katsayısı (düzeltilmiş R^2) ve Mallows' C_p istatistiğidir. Düzeltilmiş R^2 değeri, R^2 değerinden daha düşüktür ve ne kadar yüksekse model o kadar uygundur. Mallows' C_p istatistiği ne kadar düşüğe model o kadar uygundur (Bektaşoğlu, 2016).

Çalışma parametreleri kullanılarak yapılan en iyi alt kümeler regresyonu sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

En iyi alt kümeler regresyonu sonucunda 5 nolu modelin, en yüksek düzeltilmiş R^2 ve en düşük Mallows' C_p değerine sahip olduğundan elastisite modülünün tahminine yönelik en uygun model olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin kullanılmasıyla oluşturulan çoklu doğrusal regresyon modeli Eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$E = -11999 + 102431 MC - 85,6 UCS + 2076 TS + 227,2 c + 40773 K_H \quad (1)$$

Eşitlik 2.1'de verilen regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,993 olarak bulunmuştur. Kurulan bu model istatistiksel anlamda tuz domunun elastisite modülünü oldukça güvenilir bir şekilde tahmin edebilmektedir. Belirlenen değerlerle Eşitlik 2.1'den elde edilen tahmini değerler arasındaki ilişki de bu kapsamda değerlendirilmiştir. Belirlenen ve tahmini değerler

Çizelge 2. Elde edilen parametrelerin temel istatistikleri

| Değişken | Ortalama | Standart sapma | Minimum değer | Maksimum değer | Skewness (Çarpıklık) | Kurtosis (Basıklık) |
|----------|----------|----------------|---------------|----------------|----------------------|---------------------|
| ACD | 1319 | 127,6 | 1159 | 1449 | -0,43 | -1,71 |
| UVM | 2,157 | 0,033 | 2,107 | 2,216 | 0,19 | -0,12 |
| MC | 0,094 | 0,012 | 0,083 | 0,124 | 2,00 | 4,49 |
| UCS | 25,130 | 5,720 | 14,600 | 31,400 | -0,75 | -0,53 |
| TS | 1,768 | 0,235 | 1,480 | 2,300 | 1,57 | 3,21 |
| c | 12,970 | 4,930 | 8,520 | 22,510 | 0,91 | -0,15 |
| K_H | 0,074 | 0,025 | 0,058 | 0,136 | 2,21 | 5,14 |
| K_V | 0,069 | 0,011 | 0,059 | 0,094 | 1,65 | 2,64 |
| E | 5131 | 1112 | 3253 | 6360 | -0,59 | -1,09 |

Çizelge 3. En iyi alt kümeler regresyonu sonuçları

| Model No | R^2 | Düzeltilmiş R^2 | C_p | Ortalama karesel hata (MSE) | UVM | MC | UCS | TS | c | K_H | K_V |
|----------|-------|-------------------|-------|-----------------------------|-----|----|-----|----|---|-------|-------|
| 1 | 77,7 | 74,5 | 36,3 | 561,4 | | | | | | | X |
| 2 | 80,7 | 74,3 | 32,7 | 563,6 | | | X | | | | X |
| 3 | 82,5 | 72,0 | 31,4 | 588,2 | | | X | | | X | X |
| 4 | 90,1 | 80,2 | 19,4 | 495,0 | | X | | X | X | X | |
| 5 | 99,3 | 98,2 | 4,3 | 149,1 | | X | X | X | X | X | |
| 6 | 99,5 | 97,8 | 6,0 | 164,0 | | X | X | X | X | X | X |
| 7 | 99,5 | 95,7 | 8,0 | 231,0 | X | X | X | X | X | X | X |

Çizelge 4'te, bu değerler arasındaki ilişki Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 incelendiğinde, belirlenen değerlerle tahmini değerler arasında da % 99,3 oranında bir ilişki olduğu görülmüştür.

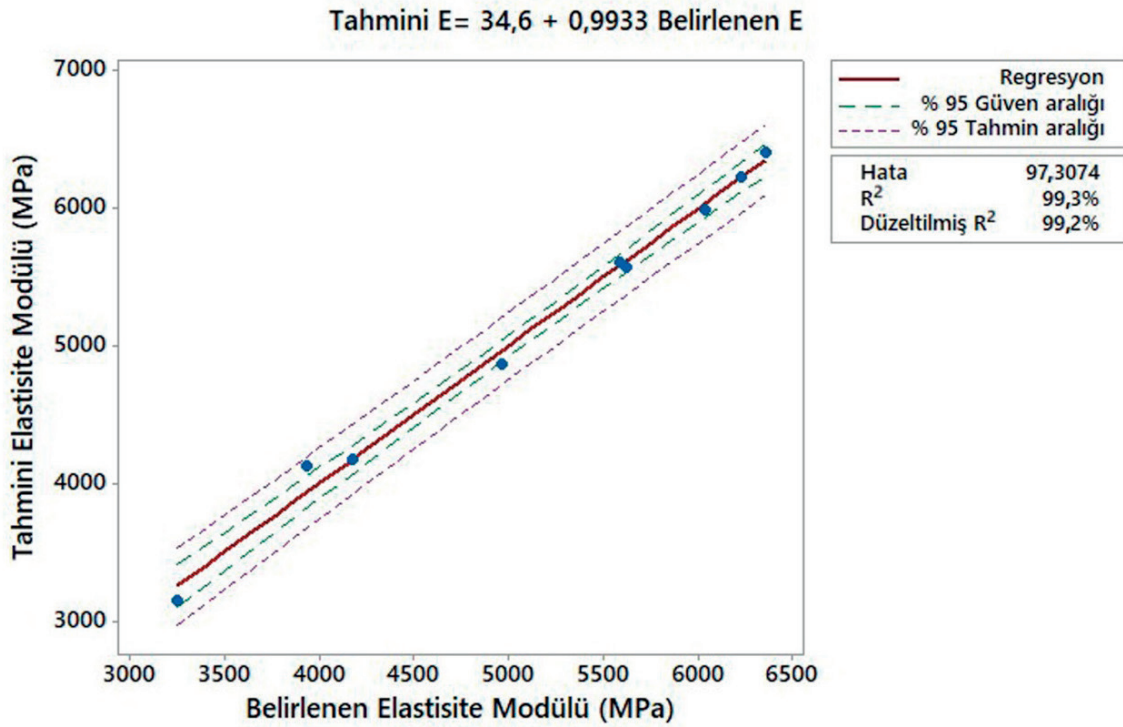
Çalışma kapsamında kurulan regresyon modelinin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Yapılan analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4. Belirlenen ve tahmini elastisite modülü

| Belirlenen elastisite modülü (MPa) | Tahmini elastisite modülü (MPa) |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 6039 | 5989 |
| 4968 | 4878 |
| 5594 | 5606 |
| 4181 | 4186 |
| 6230 | 6234 |
| 5624 | 5574 |
| 3934 | 4140 |
| 3253 | 3164 |
| 6360 | 6412 |

P olasılık değeri, istatistiksel olarak modelin geçerliliğinin ve anlamlılığının tespitinde kullanılır ve P olasılık değerinin 0,005 ile 0,001 arasında olması, yüksek düzeyde istatistiksel anlamlılık ifade etmektedir. Çizelge 5'te verilen varyans analizine göre kurulan modelin P olasılık değeri (0,002) bu durumu karşılamaktadır. Dolayısıyla, kurulan model istatistiksel olarak geçerli ve anlamlı bir modeldir.

İstatistiksel çalışmaların ikinci aşamasında, elastisite modülünün farklı derinliklere göre tahminine yönelik çalışmalar yürütülmüştür. İstatistiksel çalışmaların bu aşamasında, ortalama karot derinliği ilk aşamadaki çoklu doğrusal regresyon analizine kategorik değişken olarak ilave edilmiş ve ilk aşamadaki tüm verilerle kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizi yapılmıştır. Bu regresyon analizi sonucunda ortalama karot derinliğine göre elde edilen elastisite modülü tahmin modelleri Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 1. Belirlenen ve tahmini elastisite modülü arasındaki ilişki

Çizelge 5. Elastisite modülü tahmini için kurulan regresyon denkleminin varyans analizi

| Kaynak | Serbestlik derecesi | Düzeltilmiş karelerin toplamı | Düzeltilmiş ortalamanın karesi | F değeri | P (Olasılık) |
|----------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------------|
| Model | 5 | 9822153 | 1964431 | 88,31 | 0,002 |
| MC | 1 | 6400796 | 6400796 | 287,76 | 0,000 |
| UCS | 1 | 913540 | 913540 | 41,07 | 0,008 |
| TS | 1 | 1476127 | 1476127 | 66,36 | 0,004 |
| c | 1 | 5256673 | 5256673 | 236,32 | 0,001 |
| K _H | 1 | 4344513 | 4344513 | 195,31 | 0,001 |
| Hata | 3 | 66731 | 22244 | | |
| Toplam | 8 | 9888884 | | | |

Çizelge 6. Kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizinden elde edilen tahmin modelleri

| Ortalama karot derinliği (m) | Elastisite modülü tahmin modelleri |
|------------------------------|--|
| 1159 | $E = -12361 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$ |
| 1349 | $E = -11965 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$ |
| 1449 | $E = -11988 + 102680 MC - 107,45 UCS + 2287 TS + 227,02 c + 44283 K_H$ |

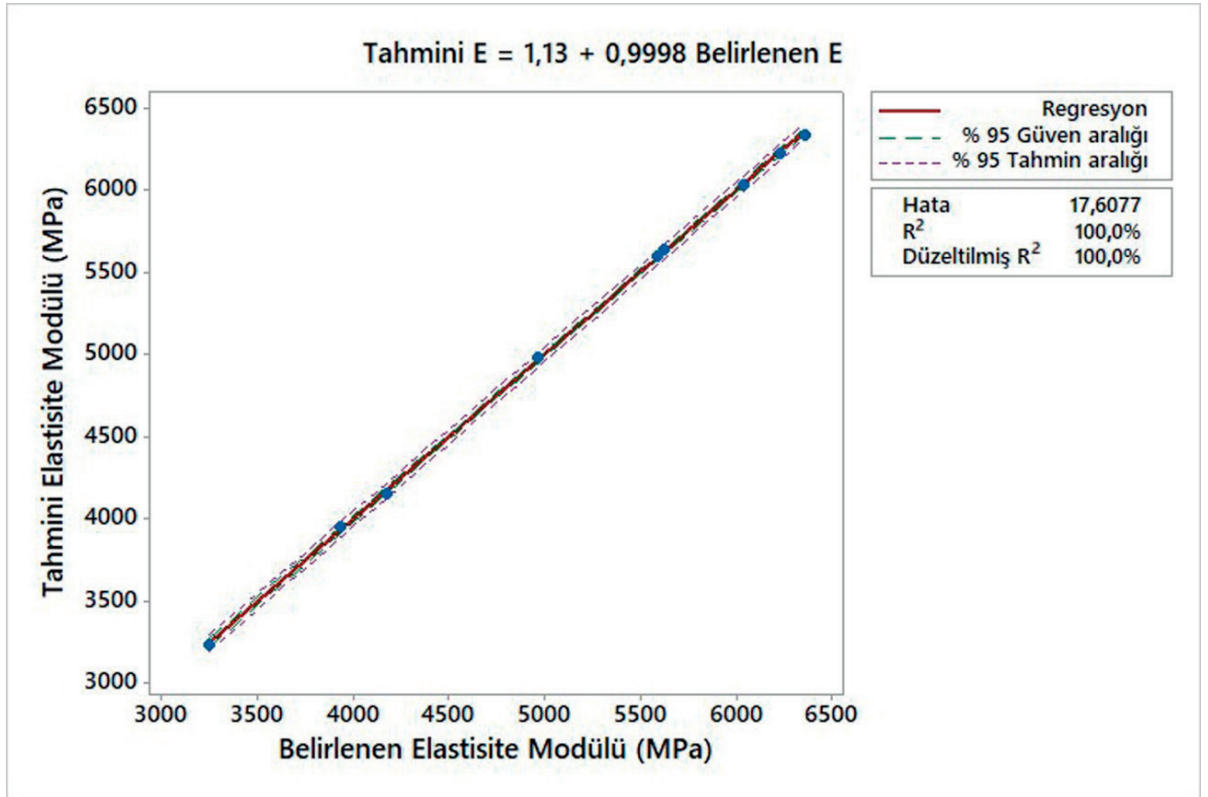
Çizelge 6'da verilen tahmin modelleri kullanılarak elde edilen tahmini elastisite modül değerleri ile belirlenen değerler Çizelge 7'de, bu değerler arasındaki ilişki ise Şekil 2'de verilmiştir. Kategorik değişkenli çoklu doğrusal regresyon analizinde modellerin R^2 değerleri, genellikle çoklu doğrusal regresyon modellerinkinden büyüktür. Şekil 2 incelendiğinde, belirlenen değerlerle tahmini değerler arasında da % 99,9 oranında bir ilişki olduğu görülmüştür.

Kurulan kategorik değişkenli regresyon modellerin geçerliliği, varyans analizi (ANOVA) ile test edilmiştir. Yapılan analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8'de verilen varyans analizine göre kurulan modellerin P olasılık değeri 0,03 olarak gerçekleşmiştir. P değeri 0,01 ile 0,05 arasında olması, modellerin istatistiksel açıdan anlamlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, kurulan modeller istatistiksel olarak geçerli ve anlamlı modellerdir.

Çizelge 7. Belirlenen ve ortalama karot derinliğine bağlı tahmini elastisite modülü

| Belirlenen elastisite modülü (MPa) | Tahmini elastisite modülü (MPa) |
|------------------------------------|---------------------------------|
| 6039 | 6038 |
| 4968 | 4987 |
| 5594 | 5601 |
| 4181 | 4161 |
| 6230 | 6226 |
| 5624 | 5638 |
| 3934 | 3954 |
| 3253 | 3238 |
| 6360 | 6338 |



Şekil 2. Belirlenen ve ortalama karot derinliğine bağlı tahmini elastisite modülü arasındaki ilişki

Çizelge 8. Elastisite modülü için kurulan kategorik değişkenli regresyon modellerin varyans analizi

| Kaynak | Serbestlik derecesi | Düzeltilmiş karelerin toplamı | Düzeltilmiş ortalamanın karesi | F değeri | P (Olasılık) |
|--------|---------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|--------------|
| Model | 7 | 9886714 | 1412388 | 650,66 | 0,030 |
| MC | 1 | 6426377 | 6426377 | 2960,51 | 0,012 |
| UCS | 1 | 616486 | 616486 | 284,00 | 0,038 |
| TS | 1 | 803567 | 803567 | 370,19 | 0,033 |
| c | 1 | 1521699 | 1521699 | 701,02 | 0,024 |
| K_H | 1 | 3186944 | 3186944 | 1468,16 | 0,017 |
| ACD | 2 | 64561 | 32280 | 14,87 | 0,180 |
| Hata | 1 | 2171 | 2171 | | |
| Toplam | 8 | 9888884 | | | |

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Tuz Gölü Havzasına ait tuz numunelerinin elastisite modülü değerlerinin bazı kayaç özelliklerinden tahmini amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar şunlardır:

- Çalışma kapsamında değerlendirilen kayaç özelliklerinden E ile en çok ilişkili olan özelliklerin MC, UCS, TS, c ve K_H olduğu tespit edilmiştir.
- Elde edilen sonuçlara göre kaya tuzunun nem içeriği, elastisite modülünü doğrudan etkileyecek fiziksel bir özelliktir. Nem içeriği, kayacın dayanımını ve dolayısıyla elastisite modülünü etkiler. Tek eksenli basma ve çekme dayanımları ve malzeme kohezyonu da kayacın dayanım ve sertliğinin bir göstergesi sayılabilecek elastisite modülüyle doğrudan ilişkili mekanik özelliklerdir. Kaya tuzu gibi kayaçların çözünmeleri, kayacı oluşturan tanelerin arasındaki bağ ve yüzey özellikleriyle ilişkilidir. Bu yüzden kayacın fizikokimyasal özelliklerinden olan deneysel yatay çözünme hızı ile elastisite modülü arasında bir ilişki kurulabilir.
- MC, UCS, TS, c ve K_H parametreleri kullanılarak E'nin tahminine yönelik çoklu doğrusal regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.
- Regresyon denkleminin belirtme katsayısı (R^2) 0,993 olarak bulunmuştur.

• Elde edilen regresyon denkleminin istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı olduğu tespit edilmiştir.

• Ortalama karot derinliğine bağlı olarak yapılan kategorik değişkenli çoklu regresyon analizinden elde edilen tahmin modelleri, farklı derinlikler için elastisite modülünün gerçek değerlere çok daha yakın tahminini sağlamıştır.

Hem genel hem de kategorik şekilde elde edilen regresyon denklemleri, Tuz Gölü Havzasında farklı derinliklerdeki tuz numunelerinin elastisite modülünün tahmininde kullanılabilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, makale yazarlarından İlker Bektaşoğlu'nun yüksek lisans tezinin bir alt çalışması olarak üretilen bir çalışmadır. Yazarlar, yüksek lisans tez çalışmasına desteğinden dolayı BOTAŞ Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi'ne teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Arıkan, D., Şenyur, M. G., 2008. Sultanhanı (Aksaray) Beldesi Tuz Örneklerinin Sünme Davranışının İncelenmesi. Türk Kaya Mekaniği Dergisi, 16, 45-52.

- Bektaşoğlu, İ., 2016. Tuz Gölü Havzasında Doğal Gaz Depolama Amaçlı Yeraltı Açıklıklarının Oluşturulmasında Kayaç Özelliklerinin Çözünme Hızına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.109.
- Brouard, B., Berest, P., Couteau, J., 1997. Influence of the Leaching Phase on the Mechanical Behavior of Salt Caverns. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 34 (3-4), 26.e1-26.e15.
- DeVries K. L., Mellegard K. D., Callahan G. D., 2002. Salt Damage Criterion Proof-of-Concept Research, Topical Report RSI-1675 for United States Department of Energy National Energy Technology Laboratory, p. 188.
- ISRM, 1981. ISRM Suggested Methods Rock Characterization, Testing and Monitoring, Pergamon Press, Oxford, p. 211.
- Jianqiang, G., Xinrong, L., Junbao, W., Liang, Z., 2013. Creep Model Analysis of Rock Salt Cavern Under Normal Operations. *Journal of Information & Computational Science*, 10 (12), 3815-3823.
- Liang, W., Yang, C., Zhao, Y., Dusseault, M. B., Liu, J., 2007. Experimental Investigation of Mechanical Properties of Bedded Salt Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (3), 400-411.
- Liang, W., Zhang, C., Gao, H., Yang, X., Xu, S., Zhao, Y., 2012. Experiments on Mechanical Properties of Salt Rocks under Cyclic Loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4(1), 54-61.
- Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D., 2014. Discontinuum-Mechanical Behavior of Salt Rocks and the Practical Relevance for the Integrity of Salt Barriers. SMRI Technical Conference, Groningen, The Netherlands.
- Moghadam, S. N., Mirzabozorg, H., Noorzad, A., 2013. Modeling Time-Dependent Behavior of Gas Caverns in Rock Salt Considering Creep, Dilatancy and Failure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 171-185.
- Özarlan, A., Geniş, M., Bilir, M. E., 2007. Doğal Gaz Depolama Amaçlı Yeraltı Tuz Çözelti Açıklıklarının Farklı İşletme Koşulları Altında Duraylılığın İncelenmesi. TÜBİTAK MAG Projesi (104M132), s.117.
- Özkan, İ., Düzyol, S., 2004. Kaya Tuzu Üzerinde Bazı Mühendislik Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi. VII. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Sivas.
- Passaris, E., Jessop, M., Slingsby, J., 2015. Verification of the Salt Creep Parameters Using Data from the Echometric Surveys of Aldbrough Gas Storage Caverns in the UK. SMRI Technical Conference, Rochester, New York, USA, 1-11.
- Qiqi, W., Guosheng, D., Yan, Z., Kang, L., Jingen, D., Yali, Z., 2018. Key Technologies for Salt-Cavern Underground Gas Storage Construction and Evaluation and Their Application. *Natural Gas Industry B*, 5, 623-630.
- Rouabhi, A., Hévin, G., Soubeyran, A., Labaune, P., Louvet, F., 2017. A Multiphase Multicomponent Modeling Approach of Underground Salt Cavern Storage. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 12, 21-35.
- Singh, A., Kumar, C., Kannan, L. G., Rao, K. S., Ayothiraman, R., 2017. Rheological Behaviour of Rock Salt under Uniaxial Compression. *Procedia Engineering*, 173, 639-646.
- Vouille, G., Tassel, P., 1979. Stability of Caverns Created in Rock Salt by Solution Mining. 5th International Symposium on Salt-Northern Ohio Geological Society, 183-185.
- Wang, T. T., Ma, H. L., Shi, X. L., Yang, C. H., Zhang, N., Li, J. L., Ding, S. L., Daemen, J. J. K., 2018. Salt Cavern Gas Storage in an Ultra-Deep Formation in Hubei, China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 102, 57-70.
- Wang, T. T., Yan, X. Z., Yang, X. J., Yang, H. L., 2010. Dynamic Subsidence Prediction of Ground Surface above Salt Cavern Gas Storage Considering the Creep of Rock Salt. *Science China Technological Sciences*, 53 (12), 3197-3202.
- Wijermars, E. A. M., 2013. Geomechanical Modelling and Subsidence Prediction of Salt Deposits for Solution Mining, MSc Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, p. 145.
- Xiangzhen, Y., Tongtao, W., Henglin, Y., Xiujuan, Y., Tingting, J., Shuai, Z., 2013. A New Shape Design Method of Salt Cavern Used as Underground Gas Storage. *Applied Energy*, 104, 50-61.
- Xing, W., Zhao, J., Düsterloh, U., Brückner, D., Hou, Z., Xie, L., Liu, J., 2014. Experimental Study of Mechanical and Hydraulic Properties of Bedded Rock Salt from the Jintan Location. *Acta Geotechnica*, 9, 145-151.
- Zapf, D., 2014. Rock Mechanical Dimensioning of Gas Storage Caverns in the Salt Dome Edge Region. SMRI Technical Conference, Groningen, The Netherlands.



Orijinal Araştırma / Original Research

PATLATMA KAYNAKLI TİTREŞİMLERİN YAPAY SINİR AĞLARI KULLANILARAK TAHMİNİ

PREDICTION OF BLAST INDUCED GROUND VIBRATIONS BY USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abdulkadir Karadoğan^{a,*}, Meriç Can Özyurt^{a,**}, Ülkü Kalaycı Şahinoğlu^{a,***}, Ümit Özer^{a,****}

^a İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 9 Haziran / June 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 2 Kasım / November 2020

Keywords:

Patlatma,
Titreşim,
Yapay Sinir Ağları.

Anahtar Sözcükler:

Blasting,
Vibration,
Artificial Neural Networks.

ABSTRACT

Bu çalışmada patlatma kaynaklı titreşim hızının tahmin edilmesinde yapay sinir ağları (YSA) kullanılmıştır. Bu kapsamda, İstanbul'da bulunan bir taşocağında yapılan patlatmalar izlenmiş ve patlatmalardan kaynaklanan titreşimler kayıt altına alınmıştır.

İzlenen ilk 12 atımda kaydedilen 24 olaya ait maksimum parçacık hızları ile ölçekli mesafeler istatistiksel analize tabi tutulmuş ve sahanın spesifik titreşim yayılım denklemi elde edilmiştir. Bu veri seti ayrıca, ölçekli mesafenin giriş, maksimum parçacık hızının ise çıkış olduğu bir YSA modelinin eğitilmesinde kullanılmış; ve ilgili sahada patlatma kaynaklı titreşimlerin tahmin edilmesinde kullanılan yeni bir model geliştirilmiştir. Titreşim yayılım denklemi ve geliştirilen YSA modeli kullanılarak, sonradan izlenen 19 atım için titreşim hızı tahminleri yapılmış, elde edilen değerler ile kaydedilen 37 olay karşılaştırılmıştır. Titreşim yayılım denklemi ile hesaplanan değerler ile kaydedilen olaylar arasında yüksek korelasyonlu doğrusal bir ilişki olduğu; YSA modelinin çıkışları ile kaydedilen olaylar arasında ise daha yüksek korelasyonlu doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür.

ÖZ

In this study, artificial neural networks (ANN) were used as a tool for estimation of blast-induced vibrations. For this purpose, the blast shots carried out in a quarry in İstanbul were monitored and the blast-induced vibrations were recorded.

Peak Particle Velocities (PPV) and Scaled Distances (SD) of 24 events were recorded in the first 12 shots, subjected to statistical analysis and the site-specific ground vibration propagation equation was obtained. This data set was also used to train an ANN model while SD was an input and PPV was an output; and a new model, that used to estimate blast-induced vibrations in the related field, was developed. Using the vibration propagation equation and the developed ANN model, blast-induced vibrations were estimated for 19 shots performed subsequently, and the results were compared with 37 recorded vibration data. It was seen that there was linear relationship with a high correlation between the values calculated with the equation and recorded data; and there was linear relationship with a higher correlation between outputs of ANN model and recorded data.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: meric.ozyurt@istanbul.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-7545-7756>

** akadir@istanbul.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7321-3320>

*** ukalayci@istanbul.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-2375-2550>

**** uozer@istanbul.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5930-0321>

GİRİŞ

Sayısal yöntemler, matematik problemlerinin aritmetik işlemlerle çözülebilmelerini sağlayacak şekilde formüle edildiği tekniklerdir. Bilgisayarların gelişmesi ve sayısal yöntemler ile kurdukları ortaklıklar sonucu elde edilen arttırılmış hesaplama gücü sayesinde sayısal yöntemler, bilgisayarın gücünü doğrudan çözümde elde etmede kullanarak, basitleştirmeler için varsayımlara ve zaman alıcı tekniklere gerek duymadan hesaplamaların yapılmasını, sistem duyarlılığının ve davranışının araştırılıp incelenmesi için daha fazla zaman ve sezgisel düşünce özgürlüğü imkânı sağlamıştır (Chapra ve Canale, 2015). Ancak, sayısal yöntemler ile birçok karmaşık probleme kısa sürede çözüm üretilebilmesine karşın, idrak etme ve tecrübelerle kazanılmış bilgileri kullanabilme noktasında yetersiz kalınmıştır (Elmas, 2011). Dolayısıyla, sayısal yöntemlerin sadece sınırları belirlenmiş bir sistem içerisinde bulunan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılabileceği söylenebilir.

Araştırmacılar, çok kısa bir sürede idrak edebilen, tepki verebilen ve aynı zamanda da tecrübelerle bilgi kazanabilen bir “zekâ”nın bilgisayarlar vasıtası ile üretmenin yollarını aramışlar ve insan davranışlarının modellenmesi yolunda çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar neticesinde Uzman Sistem, Bulanık Mantık, Genetik Algoritma ve Yapay Sinir Ağları gibi akıllı sistemler geliştirilmiştir (Elmas, 2011). Özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA) sayesinde yapay zekâ çalışmaları ivme kazanmış, sanayi toplumu yerini bilgi toplumuna bırakmaya başlamıştır (Öztemel, 2016).

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Olayların örneklerini çalışarak ilgili olay hakkında genellemeler yapmakta, bilgiler toplamakta ve daha sonra hiç görmediği örnekler ile karşılaştığında ise öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler hakkında karar verebilmektedir. Ancak, bu kararı nasıl verdiğine dair bir açıklama yeteneği mevcut değildir. Buna rağmen, özellikle çok sayıda bilginin değerlendirilmesini gerektiren olaylarda çok başarılı sonuçlar ürettikleri görülmüştür. Bunun sonucunda da araştırmacıların dikkatini çekmeyi başarmış, aralarında madencilikte bulunduğu birçok alanda problemlerin çözümünde tercih edilen bir teknoloji haline gelmiştir (Allahverdi, 2002; Rajasekaran ve Pai, 2005; Khandelwal ve Singh, 2006; Elmas, 2011; Öztemel, 2016). Madencilik alanında Yapay

Sinir Ağları'nın kullanıldığı çalışmaların bir bölümü aşağıda sunulmuştur.

Adeli ve We (1998) bir kazı faaliyetinin ekonomik sonuçlarını, Özyurt ve Karadoğan (2018) kazıda mekanizasyonun sağlanabilirliğini tahmin etmiş; Leu vd (2001) tahkimat sisteminin gerilmeler karşısındaki davranışını, Ambrozic ve Turk (2003), Yılmaz (2009) ve Lee vd (2012) göçük riskini, Düzgün (2005), Zhang vd. (2007) Guo vd. (2009), He vd. (2009), Hu (2010) ve Liu (2014) metan konsantrasyonundaki değişimi, Singh vd. (2004), Singh ve Singh (2005), Khandelwal ve Singh (2006), Sawmliana vd (2007), Singh vd. (2008), Mohammad (2009) ve Özer vd. (2019) patlatma ve çevresel çıktılarını modellemiş; Özyurt (2018) bir maden yatağı için en uygun üretim yöntemini belirleyen bir model, Özyurt ve Karadoğan (2019) ise tavanın kontrol altına alınması parametresini temel alan bir model geliştirmiş; Cheng vd (2005) ise bir yeraltı işletmesinin havalandırma sistemini optimize etmiştir.

Bu çalışmada ise, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile İstanbul'da bulunan bir taşocağında yapılan patlatmalardan kaynaklı titreşimlerin tahmin edilmesi amaçlanmıştır. YSA ile elde edilen bulgular, literatürde yaygın bir şekilde kabul görmüş ampirik maksimum parçacık hızı yayılım denklemi ile hesaplanan değerler ve gerçek sonuçlar ile kıyaslanarak YSA kullanımının verimliliği incelenmiştir.

1. MATERYAL VE METOD

1.1. Maksimum Parçacık Hızı ve Yayılım Denklemi

Patlatma kaynaklı titreşim yayılımının belirlenmesi üzerine birçok önemli çalışma ortaya konmuştur (Ambraseys ve Hendron, 1968; Dowding, 1985; Ghosh ve Daemen, 1983; Gupta vd., 1988; Jimeno vd., 1995; Nicholls vd., 1971). Araştırmacılar titreşim yayılımlarını belirlemek üzere farklı ampirik yaklaşımlar kullanmışlardır.

Bu çalışmalarda, maksimum parçacık hızı (PPV) yapısal hasarın önemli bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Maksimum parçacık hızı, gecikme başına maksimum şarj miktarına, patlama noktasından ölçüm noktasına olan mesafeye ve çevrenin özellikleri bağlıdır (Ak vd., 2009).

Literatürde kabul görmüş çalışmalarda, çeşitli ampirik sarsıntı yayılım denklemleri kullanılarak maksimum parçacık hızları tahmin edilir. Bu eşitlikler, sahanın jeolojik ve teknolojik koşulları ve ölçekli mesafenin bir fonksiyonu olarak PPV'yi verir (Kuzu, 2008).

PPV'yi tahmin etmede en yaygın kullanılan formül Eşitlik 1'de verilmiştir. Burada; PPV maksimum parçacık hızını (mm/sn), k ve B saha sabitlerini, SD ise ölçekli mesafeyi ifade etmektedir (Dowding, 1985).

$$PPV = k (SD)^{-\beta} \quad (1)$$

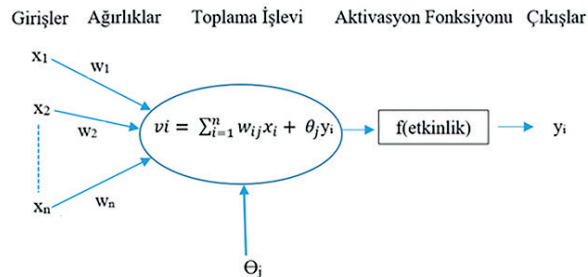
Ölçekli mesafenin belirlenmesinde literatürde en sık kullanılan formül Eşitlik 2'de verilmektedir. Burada; SD ölçekli mesafeyi, R patlatma noktasından uzaklığı (m), W ise gecikme başına maksimum patlayıcı madde miktarını (kg) ifade etmektedir (Dowding, 1985).

$$SD = R / \sqrt{W} \quad (2)$$

1.2. Yapay Sinir Ağları

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin sinir ağlarını taklit eden bilgisayar programlarıdır. Olayların örneklerini çalışarak ilgili olay hakkında genellemeler yapmakta, bilgiler toplamakta ve daha sonra yeni örnekler karşısında ise öğrendiği bilgileri kullanarak o örnekler hakkında karar verebilmektedir. Ancak, bu kararı nasıl verdiğine dair bir açıklama yeteneği mevcut değildir. (Rajasekaran ve Pai, 2005; Öztemel, 2016).

Yapay sinir ağlarının ana öğeleri; girişler (x_i), ağırlıklar (w_i), toplama işlevi sonucu elde edilen hücrenin net giriş değeri (v_i), eşik değeri (Θ_j) ve çıkışlardır (y_j). Şekil 1'de de görüldüğü üzere, girişler ağırlıkları ile çarpılır, elde edilen değerler eşik değeri ile toplanır ve net giriş değeri elde edilir. Net giriş değerinin aktivasyon fonksiyonunda işlem görmesi ile çıktı alınır (Elmas, 2011).



Şekil 1. Bir yapay sinir ağları modeli (Elmas, 2011)

Problemin karmaşıklığı ve/veya zorluğu arttıkça, istenen çıkışlara (hedeflere) ulaşılabilme için giriş ve çıkış katmanına ek olarak gizli katman(lar) modele dahil edilebilir. Probleme uygun gizli katman sayısı ve bu katman(lar)daki nöron adedi deneme ve yanılma yolu ile belirlenir, literatürde buna yönelik bir yaklaşım bulunmamaktadır.

Yapay sinir ağları, bir olaya ait örnekler kullanılarak eğitilir. Eğitim, istenen bir işlevi yerine getirecek şekilde bağlantılar arasındaki ağırlıkların ayarlanması sürecidir. Bu süreçte, bir sonraki iterasyonda çıkışların hedeflere daha yakın değer alacak şekilde ağırlıklar dinamik olarak güncellenir. Çıkışlar ile hedefler arasındaki hataların kareleri toplamının (MSE) minimize edildiği noktada öğrenme tamamlanır (Elmas, 2011).

Danışmanlı öğrenme yöntemleri içerisinde, hata minimizasyonu konusunda en etkili çözümleri sunan yöntem geri yayılım algoritmalarıdır. Bu algoritmaların başarısı, her yeni iterasyonda elde edilen hata bilgisinin geri beslenerek, bir sonraki iterasyonda ağırlıkların bu bilgiye göre optimize edilmesine dayanmaktadır. En önemli geri yayılım algoritmaları ise Levenberg Marquadt (LM), Bayes (BR) ve Ölçekli Eşlenik İndirgeme (SCG) algoritmalarıdır (Mathworks, 2017; Baghirli, 2015; Pan vd., 2013).

Bu çalışmada, hata kareleri toplamının en düşük olduğu ve hedefler ile çıkışlar arasında en yüksek korelasyonlu ilişkilerin sunulduğu model, Bayes (BR) algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiş bir eğitim prosesi sonucunda elde edilmiştir. Bu nedenle, sadece Bayes algoritması detaylandırılmıştır.

1.2.1. Bayes (BR) Algoritması

BR, hataları minimize etmek için hata karelerinden ve ağırlık karelerinden oluşan bir kombinasyonu kullanır (Eşitlik 3). Burada; EW ağırlık kareleri toplamı, ED hata kareleri toplamı (MSE), α ve β ise fonksiyon parametreleridir.

$$F(w) = \alpha E_W + \beta E_D \quad (3)$$

α ve β 'nin belirlenmesinde ise Bayes teoremi kullanılır. Bayes teoremi, öncelikli ve arka olasılıkları temel alan iki değişken ile ilişkilidir (Eşitlik 4). $P(A|B)$ A'nın B üzerindeki arka olasılığı, $P(B|A)$ ise B'nin A üzerindeki öncelikli olasılığıdır.

(B), B'nin sıfıra eşit olmayan öncelikli olasılığıdır ve normalize sabiti olarak tanımlanır.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (4)$$

Ağırlıkları optimize etmek için ise Eşitlik 5 kullanılır. Burada; α ve β optimize edilecek parametreler, D ağırlık dağılımı, M yapay sinir ağırları mimarisi, $P(D|M)$ normalizasyon faktörü, $P(D|\alpha,\beta,M)$ D'nin α , β ve M için D'nin benzerlik fonksiyonudur. Arka fonksiyonu $P(\alpha,\beta |D,M)$ 'in maksimize edilmesi, benzerlik fonksiyonunun maksimize edilmesine denktir.

$$P(\alpha, \beta |D, M) = \frac{P(D|\alpha,\beta,M) P(\alpha,\beta|M)}{P(D|M)} \quad (5)$$

Uygun α ve β 'nin belirlenmesi ile ağırlıkların alabileceği değer aralıkları bulunur. Ardından, LM algoritması ile hatalar ve ağırlıklar belirlenir. Yakınsama sağlanamazsa; α ve β revize edilir (Yue ve Rue, 2011; Baghirli, 2015).

1.3. Çalışma Sahası

Çalışma sahası, Çatalca Yarımadası'nda Alibeyköy Barajı'nın batısında bulunan Cebeciköy arazisinde yer almaktadır (Şekil 2). Arazi kuzeyden Fener Tepe (240 m), Çıplak Tepe (207 m), Pirinciköy üstü (192 m) Bahçeköy üstü (230 m) sırtı ile çevrilidir. Bu sırt Karadeniz ile Marmara Denizi'ne akan derelerin de su ayırımı çizgisidir. Arazi; Marmara Denizine inen dere vadilerinin üst kesimindeki 140-150 m yükseltili tepelerle (üç tabya 172 m) çevrelemiştir. Dere Havzası doğuya doğru 150 m'ye alçalarak (Malova Deresi'ne/ Alibey Köyü Barajına) açılmaktadır (Kantarci, 2013).



Şekil 2. Çalışma sahasının uydu görüntüsü ve lokasyon haritası

Çalışma sahasında, aynı jeolojik birim içerisinde birden fazla noktada üretim yapılmaktadır.

1.3.1 Saha Jeolojisi

İstanbul Boğazı'nın batı yakasında çoğunlukla Trakya formasyonu izlenir. İnceleme alanında da ağırlıklı olarak İstanbul Paleozoyik istifine ait Trakya formasyonu yayılım sunmaktadır. Trakya formasyonu İstanbul Paleozoyik istifinin üst seviyelerini oluşturmaktadır ve Karbonifer yaşlıdır. Formasyon ayrışma zonunda ağırlıklı olarak kahverengi gri, yeşilimsi kahve renkli ince tabakalı ve laminalı şeyllerden oluşmaktadır. Birim içerisinde grovak ve şeyllerin yanı sıra kumtaşı, çakıltası ve yer yer de kireçtaşı ara seviyeleri izlenmektedir (Kantarci, 2013).

2. BULGULAR

2.1. Patlatmalı Kazıların Çevresel Çıktıları

Çalışma kapsamında, çalışma sahasındaki patlatmalı kazıda, atımlarda uygulanan patlatma paternleri, delik düzenleri ve patlayıcı şarjları gözlemlenmiştir (Çizelge 1).

Gecikme başında düşen patlayıcı madde miktarı, her bir delik için planlanan patlayıcı maddenin kontrollü bir şekilde şarj edilmesiyle belirlenmiştir. Atım noktaları ile titreşim istasyonları arasındaki mesafeler topografik aletlerle, maksimum parçacık hızı değerleri ise titreşim ölçer cihazları ile belirlenmiştir.

Çizelge 1. Atım bilgileri

| No | B (m) | S (m) | n | n' | H (m) | Q (kg) |
|----|-------|-------|-----|-----|----------|--------|
| 1 | 2,5 | 2,5 | 110 | 3 | 3-13 | 4060 |
| 2 | 3 | 2,5 | 105 | 6 | 3-13 | 950 |
| 3 | 3 | 3 | 90 | 45 | 6-16 | 2445 |
| 4 | 3 | 3 | 90 | 6 | 10 | 3240 |
| 5 | 3 | 2,5 | 103 | 3-5 | 3-13 | 2727 |
| 6 | 3,5 | 3 | 103 | 2-4 | 3-6-13 | 4952 |
| 7 | 2,5 | 2,5 | 64 | 4 | 10-13 | 2232 |
| 8 | 2,5 | 2,5 | 52 | 2 | 8-12 | 2026 |
| 9 | 2,5 | 2,5 | 103 | 6 | 13 | 4080 |
| 10 | 2,5 | 2,5 | 160 | 10 | 10-12-13 | 7880 |
| 11 | 2,5 | 2,5 | 58 | 6 | 10-13-14 | 4060 |
| 12 | 2,5 | 2,5 | 100 | 9 | 10 | 4880 |

No: Atım numarası, B: Dilim kalınlığı, S: Delikler arası mesafe, n: Delik adedi, n': Sıra sayısı, H: Delik boyu, Q: Toplam şarj

Çalışma kapsamında; yapılan ölçümlerde 12 adet atıma ait toplam 24 adet olay cihazlar tarafından kaydedilmiştir. Kayıt altına alınan olayların maksimum parçacık hızları ve frekans değerleri ile patlayıcı madde miktarlarını ve ölçekli mesafe değerlerini içeren bilgileri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Titreşim ölçümü sonuçları

| No | W (kg) | R (m) | SD | PPV (mm/s) | F (Hz) |
|----|--------|-------|-------|------------|--------|
| 1 | 51 | 250 | 35,05 | 1,651 | 17 |
| | | 183 | 25,64 | 2,667 | 24 |
| 2 | 40,5 | 235 | 36,96 | 1,27 | 30 |
| | | 171 | 26,81 | 2,413 | 23 |
| 3 | 28,8 | 371 | 69,16 | 0,762 | 16 |
| | | 285 | 53,02 | 0,889 | 17 |
| 4 | 36 | 267 | 44,42 | 1,143 | 10 |
| | | 182 | 30,38 | 2,159 | 20 |
| 5 | 50 | 591 | 83,52 | 0,508 | 8,5 |
| | | 497 | 70,33 | 0,889 | 19 |
| 6 | 45 | 222 | 33,13 | 7,239 | 18 |
| | | 131 | 19,57 | 8,382 | 17 |
| 7 | 35 | 340 | 57,50 | 0,508 | 22 |
| | | 244 | 41,18 | 1,651 | 30 |
| 8 | 38,5 | 358 | 57,71 | 1,27 | 13 |
| | | 263 | 42,33 | 1,651 | 21 |
| 9 | 39,6 | 469 | 74,49 | 0,508 | 9,5 |
| | | 368 | 58,47 | 1,016 | 18 |
| 10 | 49,25 | 470 | 66,96 | 0,889 | 8 |
| | | 372 | 52,96 | 1,651 | 14 |
| 11 | 70 | 458 | 54,73 | 0,762 | 12 |
| | | 359 | 42,92 | 1,397 | 15 |
| 12 | 48,75 | 460 | 65,82 | 0,635 | 9,8 |
| | | 362 | 51,79 | 1,397 | 16 |

No: Atım numarası, W: Gecikme başına şarj, SD: Ölçekli mesafe, PPV: Maksimum parçacık Hızı, F: Frekans

Kaydedilen mesafe, gecikme başına toplam şarj ve maksimum parçacık hızı veri setleri kullanılarak yapılan regresyon analizi sonucunda, bölgede yapılacak kontrollü patlatma tasarımlarında parçacık hızı tahmininde kullanılması önerilen çalışma sahasının sabitleri aşağıdaki formülle ifade edilmiştir (Eşitlik 6).

$$(R^2=0,75)$$

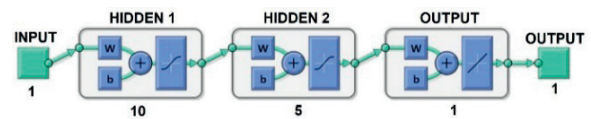
(6)

İyi bir korelasyon katsayısı ile sonuçlanmış olan bu formül, bölgede titreşim ölçer kullanılmadığı durumlarda; herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmede önemli bir yaklaşım olarak, kabul edilebilir seviyelerde bir sapma ile kullanılabilir.

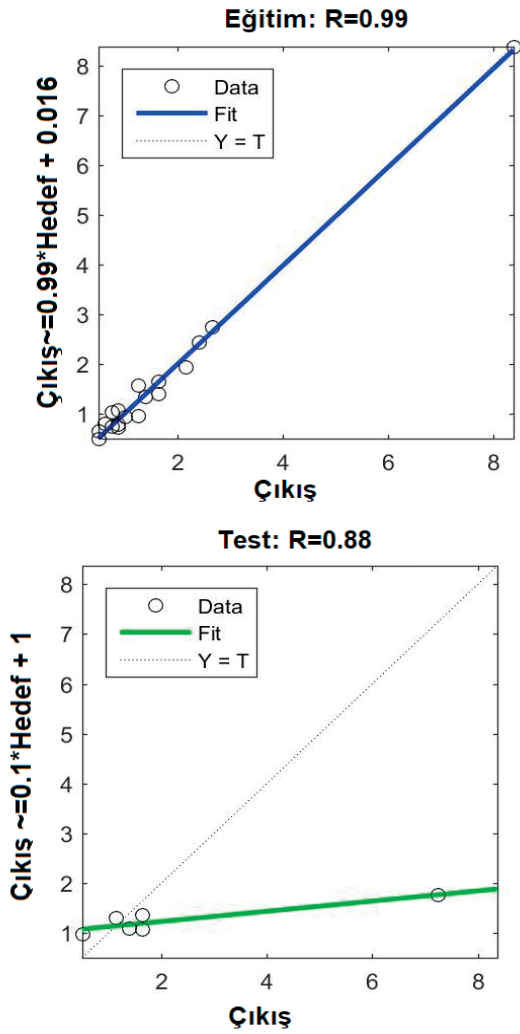
2.2. Bir Yapay Sinir Ağları Modelinin Geliştirilmesi

Ölçekli mesafe ve maksimum parçacık hızı arasındaki ilişki incelendiğinde, verilerin deneysel yöntemler ile elde edilmesi, veri noktalarına eğri uydurma gerekliliği ve verilerle ilgili bir hatanın söz konusu olmasıyla regresyon uygulanması gibi nedenlerle problemin matematiksel temelini eğri uydurma olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla, eğri uydurma modelini temel alan bir YSA modeli geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu modelin giriş katmanında ölçekli mesafeyi temsil eden 1 nöron, çıkış katmanında ise maksimum parçacık hızını temsil eden 1 nöron yer almıştır. Çalışma kapsamında izlenen 10 atımda kaydedilen 20 olaya ait ölçekli mesafe ve maksimum parçacık hızı değerleri eğitim verisi olarak YSA modeline sunulmuştur. Olaylardan 15 tanesi modelin eğitilmesinde, 5 tanesi ise test edilmesinde kullanılmıştır. Performans fonksiyonu minimize edilmeden eğitimin durması ihtimali nedeniyle doğrulama yapılması uygun görülmemiştir.

Problemin matematiksel temelini eğri uydurma olması ve giriş ile çıkış arasındaki non-linear ilişki nedeniyle Bayes öğrenme algoritması ve Hiperbolik aktivasyon fonksiyonunun kullanıldığı bir eğitim süreci başlatılmıştır. Uzman bir sistem ortaya çıkarmak adına farklı mimarilere sahip ağlar eğitilmiş, en düşük performans fonksiyonu, en yüksek korelasyonlu çıkış-hedef ilişkisi ve en düşük hata, sırasıyla 10 ve 5 nöronlu toplam 2 ara katmanın bulunduğu bir mimari ile elde edilmiştir (Şekil 3). Çıktılar ile hedefler arasındaki ilişkiler ise Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 3. PPV tahmini için geliştirilen Yapay Sinir Ağları modelinin mimarisi



Şekil 4. Çıkışlar ile hedefler arasındaki doğrusal ilişkiler

Çizelge 3. Geliştirilen YSA modelinin eğitim performansına ait bilgiler

| Parametre | Değer |
|-------------------------------|---|
| Eğitim Algoritması | Bayes |
| Aktivasyon Fonksiyonu | Tanjant Hiperbolik |
| Gizli Katmandaki Nöron Adedi | Gizli Katmanda 10 .1 Gizli Katmanda 5 .2 |
| İterasyon | 461 |
| Hata Kareleri Toplamı | 0,0275 |
| Çıkış-Hedef Arasındaki İlişki | Eğitim: R = 0,99 Test: R = 0,88 |

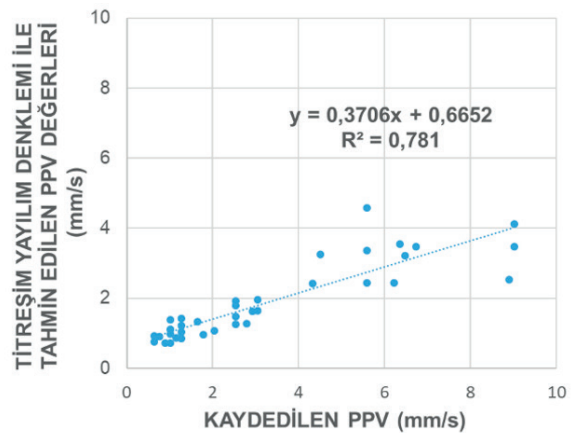
Çizelge 3'te verilen eğitim performansına ait bilgiler incelendiğinde, bölgede titreşim ölçer kullanılmadığı durumlarda; herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki bir patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerinin ne olacağını tahmin etmede ile kullanılabileceğini göstermektedir.

2.3. Geliştirilen YSA Modelinin Test Edilmesi

Çalışmada, geliştirilen YSA modeli ile maksimum parçacık hızının tahmin edilmesinde literatürde en sık kullanılan formüle dayanarak üretilen sahanın spesifik titreşim yayılım denklemi, sonradan izlenen 19 atımda kaydedilen 37 olay üzerinde ayrı ayrı test edilmiştir (Çizelge 4).

ANN modeli eğitmek için kullanılan 24 adet titreşim kaydının sadece %20'sinin, geliştirilen modeli test etmek için kullanılan 37 adet titreşim verisinin ise %56'sının 2 mm/s'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu durumun sebepleri; aynı jeolojik birim içerisinde farklı üretim noktalarında gerçekleştirilen atımlar olması ve ölçüm istasyonunun atım yönüne göre konumunun farklılık göstermesidir.

Kaydedilen PPV değerleri ile hem Eşitlik 6 ile hesaplanmış değerler, hem de ANN modelinin çıkışları arasında yapılan regresyon analizlerinde, hem titreşim yayılım denklemi ile hem de geliştirilen YSA modeli ile yüksek korelasyonlu tahminler yapıldığı görülmüştür (Şekil 5 ve 6).



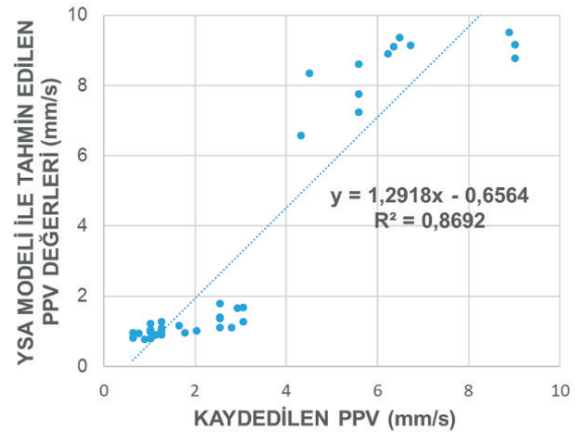
Şekil 5. Kaydedilen olaylar ile titreşim yayılım denklemi ile hesaplanan değerler arasındaki ilişki

Çizelge 4. PPV Ölçümleri ve tahminleri

| No | SD | Kaydedilen PPV (mm/s) | Eşitlik 6 ile Hesaplanan Değerler | ANN Modelinin Çıktıları |
|----|-------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 13 | 65,42 | 0,635 | 0,752 | 0,813 |
| | 51,99 | 1,016 | 1,104 | 1,034 |
| 14 | 54,08 | 1,27 | 1,033 | 1,005 |
| | 41,15 | 2,921 | 1,632 | 1,665 |
| 15 | 58,77 | 0,762 | 0,899 | 0,934 |
| | 46,68 | 1,651 | 1,322 | 1,156 |
| 16 | 56,80 | 1,778 | 0,952 | 0,966 |
| 17 | 57,58 | 0,635 | 0,930 | 0,953 |
| | 45,54 | 1,016 | 1,378 | 1,214 |
| 18 | 56,19 | 1,016 | 0,969 | 0,975 |
| | 43,72 | 2,54 | 1,475 | 1,357 |
| 19 | 48,94 | 1,27 | 1,221 | 1,086 |
| | 37,32 | 2,54 | 1,922 | 1,399 |
| 20 | 60,38 | 1,143 | 0,859 | 0,906 |
| | 48,16 | 2,54 | 1,255 | 1,106 |
| 21 | 66,82 | 1,016 | 0,725 | 0,786 |
| | 44,70 | 1,27 | 1,421 | 1,271 |
| 22 | 40,97 | 3,048 | 1,644 | 1,686 |
| | 26,22 | 9,017 | 3,468 | 9,154 |
| 23 | 36,97 | 3,048 | 1,952 | 1,267 |
| | 23,67 | 9,017 | 4,118 | 8,771 |
| 24 | 22,21 | 5,588 | 4,581 | 8,604 |
| | 25,92 | 6,35 | 3,536 | 9,103 |
| 25 | 32,55 | 4,318 | 2,417 | 6,566 |
| | 26,71 | 5,588 | 3,365 | 7,238 |
| 26 | 32,43 | 5,588 | 2,431 | 7,758 |
| | 26,19 | 6,731 | 3,477 | 9,147 |
| 27 | 32,34 | 6,223 | 2,443 | 8,895 |
| | 27,27 | 4,499 | 3,248 | 8,341 |
| 28 | 67,19 | 0,889 | 0,719 | 0,779 |
| | 53,07 | 2,032 | 1,066 | 1,019 |
| 29 | 60,91 | 1,27 | 0,847 | 0,897 |
| | 47,89 | 2,794 | 1,267 | 1,113 |
| 30 | 27,43 | 6,477 | 3,218 | 9,370 |
| | 31,74 | 8,89 | 2,521 | 9,505 |
| 31 | 51,92 | 1,016 | 1,106 | 1,035 |
| | 38,95 | 2,54 | 1,790 | 1,782 |

Şekil 5 ve 6 ile Çizelge 4 incelendiğinde iki temel sonuç göze çarpmaktadır. Birincisi, ölçekli mesafe 32'den daha büyük değerler aldığı

her iki modelin de kaydedilen titreşim hızlarına yakın tahminler üretebilmesi, ikincisi ise bu duruma karşın, ölçekli mesafenin 32'nin altına düştüğü atımlarda kaydedilen titreşim hızları ile modellerin sonuçları arasındaki hata miktarı artması, ancak YSA modeli kaydedilen olaylara daha yakın tahminler yapmasıdır. Sahada kayıt altına alındıktan tüm titreşim datası baz alındığında ise YSA modelinin titreşim yayılım tahmininde daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 6. Kaydedilen ile YSA Modelinin Çıktıları Arasındaki İlişki

Geliştirilen model ile Eşitlik 6'yı mukayese etmek adına ortalama hata kareleri toplamı (MSE), ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) ve ortalama hata kareleri kara kökü (RMSE) gibi hata ölçütü yaklaşımları kullanılmıştır (Çizelge 5). Buna göre, geliştirilen ANN modelin, Eşitlik 6'ya göre daha düşük hata ile tahminler yapabildiği görülmüştür.

Çizelge 5. Titreşim sonuçlarının hata ölçütlerine göre değerlendirilmesi

| Hata Ölçütü | Eşitlik 6 | ANN Modeli |
|-------------|-----------|------------|
| MSE | 3,885 | 2,413 |
| MAPE | 34,982 | 34,034 |
| RMSE | 0,233 | 0,194 |

Elde edilen bulgular ışığında (Çizelge 4 ve 5, Şekil 6 ve 7), geliştirilen ANN Modelinin Eşitlik 6'dan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bölgede, herhangi bir atımdaki gecikme başına kullanılan belirli miktardaki patlayıcı maddenin yaratacağı titreşimin hızının belirli bir uzaklıktaki değerini tahmin etmede kullanılmak üzere, kabul edilebilir seviyelerde bir sapma ile çıkışlar sunan bir YSA modeli geliştirilmiştir.

Çalışmada, geliştirilen YSA modeli ile maksimum parçacık hızının tahmin edilmesinde literatürde en sık kullanılan formüle dayanarak üretilen sahanın spesifik titreşim yayılım denklemi sonradan izlenen atımlarda kaydedilen olaylar üzerinde ayrı ayrı test edilmiştir. Buna göre, iki temel sonuç göze çarpmaktadır. Birincisi, ölçekli mesafe 32'den daha büyük değerler aldığı anda her iki modelin de kaydedilen titreşim hızlarına yakın tahminler üretebilmesi, ikincisi ise bu duruma karşın, ölçekli mesafenin 32'nin altına düştüğü atımlarda kaydedile titreşim hızları ile modellerin sonuçları arasındaki hata miktarı artması, ancak YSA modeli kaydedilen olaylara daha yakın tahminler yapmasıdır. Sahada kayıt altına alındıktan tüm titreşim datası baz alındığında ise YSA modelinin titreşim yayılım tahmininde daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sonuçtan yola çıkarak, birçok alanda karşılaşılan karmaşık problemlere çözüm sunan yapay sinir ağlarının, patlatma kaynaklı titreşimin tahmin edilmesinde güçlü bir alternatif olduğu ortaya konmuştur.

Yapay sinir ağları modellerinde, eğitim sürecinde kullanılan örneklerin sahayı temsil etme ölçüsü, modelin başarılı sonuçlar vermesinde en önemli rolü oynar. Bu sebeple, ilerleyen dönemlerde yapılacak her yeni patlatma verisinin örnek setine ilave edilmesi ve eğitim sürecinin sürekli kılınması büyük önem arz etmektedir. Bu koşulların sağlandığı durumlarda, bölgede devam eden patlatmalı kazı faaliyetlerine paralel olarak sürekli öğrenen bir model elde edilecektir. Dolayısıyla, sonraki atımların oluşturacağı titreşimin hızını daha yüksek bir oranda tahmin etmek mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Adeli, H., Wu, M., 1998. Regularization Neural Network For Construction Cost Estimation. *Journal of*

Construction Engineering and Management, Vol. 124, Issue 1.

Ak, H., Iphar, M., Yavuz M., Konuk, A., 2009. Evaluation of Ground Vibration Effect of Blasting Operations in a Magnesite Mine. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29: 4: 669-676.

Allahverdi, N., 2002. Uzman Sistemler: Bir Yapay Zeka Uygulaması. Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.

Ambraseys, N.R., Hendron A.J., 1968. Dynamic Behaviour of Rock Masses, in: *Rock Mechanics in Engineering Practice*.

Ambrozic, T., Turk, G., 2003. Prediction of Subsidence Due to Underground Mining. *Computers & Geosciences*, Vol. 29, Issue 5.

Baghirlı, O., 2015, Comparison of Lavenberg Marquardt, Scaled Conjugate Gradient and Bayes Regularization Backpropagation Algorithms for Multistep Ahead Wind Speed Forecasting Using Multilayer Perceptron Feedforward Neural Network. Master Thesis, Ippsala University Department of Earth Sciences, Campus Gotland.

Chapra, S.C., Canale, R.P., 2015, Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler. Literatür Yayıncılık, Çevirenler: Hasan Heperkan, Uğur Kesgin, ISBN:978-975-8431-83-0.

Cheng, L., Yang, Y., Xiong, Y., 2005. Study of Mine Ventilation System Assessment Based on Artificial Neural Network. *China safety science journal*.

Dowding, C.H., 1985. *Blast Vibration Monitoring and Control*. Prentice-Hall, USA.

Düzgün, H.S.B., 2005. Analysis of Roof Fall Hazards and Risk Assessment for Zonguldak Coal Basin Underground Mines. *International Journal of Coal Geology* 64.

Elmas, Ç., 2011. *Yapay Sinir Ağları*. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2003, s. 23.

Ghosh, A., Daemen, J.J.K., 1983. A Simple New Blast Vibration Predictore (based on wave propagation laws). 24 th U.S. Symp. on Rock Mechanics, June, 151-161

Guo D.Y., Wang Y.B., Wei X.J., Wang X.Y, 2009. Early Warning of Coal and Gas Outburst by GIS and Neural Network. *J Univ Sci Technol Beijing* 2009;31(01):15–24.

Gupta, R.N., Roy, P.P., Singh B., 1988. On a Blast Induced Blast Vibration Predictor for Efficient Blasting. *Safety in Mines Research Proceedings of the 22nd International Conference of Safety in Mines Research Institutes*.

- He, G.J., Liu S.Y., Sun Y.B. 2009. Theory and Practice of Coal Mine Accident Hidden Danger Monitoring and Early Warning. *J China Coal Soc* 2009;34(2):212–7.
- Hu, D.H., 2010. Analysis on Coal Mine Safety Accident Causes and Forewarning Management Research. Beijing: China University of Geosciences; 2010.
- Jimeno, C.L., Jimeno, E.L., Carcedo, F.J.A., 1995. Drilling and blasting of rocks. A.A., Balkema Publishers, Brookfield, ISBN: 90 5410 1977, Rotterdam Pp 390, Mathworks, 2017, Matlab Documentations.
- Karadoğan, A., Özer, Ü., Kahrıman, A., 2012. Patlatma Kaynaklı Titreşimlerin Tahmini İçin Farklı Kayaların Saha Sabitlerinin Belirlenmesi. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, C.25, S.1, SS. 9-23.
- Khandelwal, M., Singh, T.N., 2006. Prediction of Blast Induced Ground Vibrations and Frequency in Opencast Mine: A Neural Network Approach. *J Sound Vib*, 289. (4–5):711–25.
- Kuzu, C., 2008, The Importance of Site Specific Characters in Prediction Models for Blast Induced Ground Vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 5: 405-414.
- Lee, S., Park, I., Choi, J.K., 2012. Spatial Prediction of Ground Subsidence Susceptibility Using an Artificial Neural Network. *Environ Manage*, Feb;49(2):347-58. doi: 10.1007/s00267-011-9766-5. Epub 2011 Oct 18.
- Leu, S., Chen, C., Chang, S., 2001. Data Mining Fortunnel Support Stability: Neural Network Approach. *Automation in Construction*, Vol. 10, Issue 4, Pg. 429-411.
- Liu, L., 2014. Modeling and Evaluation of the Safety Control Capability of coal Mine Based on System Safety. *Journal of Cleaner Production* 84.
- Mohammad, M.T., 2009. Artificial Neural Network for Prediction and Control of Blasting Vibration in Assiut (Egypt) Limestone Quarry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 46, pp. 426–431.
- Nicholls, H.R., Johnson C.F., Duvall, W.L., 1971. Blasting Vibrations and Their Effects on Structure. United States Department of Interior, USBM, Bulletin 656.
- Özer, Ü., Karadoğan, A., Özyurt, M.C., Şahinoğlu Ü.K., Sertabipoğlu, S., 2019. Environmentally Sensitive Blasting Design Based on Risk Analysis by Using Artificial Neural Networks, *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 12, Issue 2.
- Özyurt, M.C., 2018. Yeraltı Üretim Yöntemi Seçiminde Yapay Sinir Ağları ve Oyun Teorisinin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özyurt, M.C., Karadoğan, A., 2018. Evaluation of the Feasibility of Fully Mechanized Excavation by Artificial Neural Networks. UYAK 2018, 13-14th September 2018, İstanbul, Turkey, 299-306.
- Özyurt, M.C., Karadoğan, A., 2019. Developing a Model Based on the Strata Control Parameter in the Selection of Underground Mining Method by Using Artificial Neural Networks. *İstanbul Yerbilimleri Dergisi*, Volume 30, No 1, 14-24.
- Öztemel, E., 2016. Yapay Sinir Ağları. Papatya Yayıncılık, 4.Basım, 230s.
- Pan, X., Lee, B., Zhang, C., 2013. A Comparison of Neural Network Backpropagation Algorithms For Electricity Load Forecasting. *Intelligent Energy Systems (IWIES)*, 2013 IEEE, vol., no., pp.22,27, 14-14 Nov.
- Sawmliana, C., Roy, P., Singh, R.K., Singh, T.N., 2007. Blast Induced Air Overpressure and its Prediction Using Artificial Neural Network. *International Journal of Mining Technology*, 116, pp. 41–48.
- Singh, T.N., Dontha, L.K., Bharadwaj, V., 2008. A study Into Blast Vibration And Frequency Using ANFIS and MVRA Mining Technology (TIMM A). UK, 117 (3), pp. 116–121.
- Singh, T.N., Kanchan, R., Verma, A.K., 2004. Prediction of Blast Induced Ground Vibration and Frequency Using An Artificial Intelligent Technique. *Blast Induced Ground Vibration and Frequency*, 7–15.
- Singh, T.N., Singh, V., 2005. An Intelligent Approach to Prediction and Control Ground Vibration in Mines. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23, pp. 249–262.
- Yılmaz, I., 2009. Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio, Logistic Regression, Artificial Neural Networks and Their Comprasion: a Case Study From Kat Landslides (Tokat-Turkey). *Computer and Geosciences*, 35.
- Yue, Y. Rue, H., 2011. Bayesian Inference For Additive Mixed Quantile Regression Models. *Computational Statistics and Data Analysis*, 55, 84-96.
- Zhang, X., Wang, H., Yu, H. 2007. Neural Network Based Algorithm and Simulation of Information Fusion in the Coal Mine. *Journal of China University of Mining and Technology*, Vol. 7, Issue 4, Pg. 595-598.



Teknik Not / Technical Note

ÜÇ KONİLİ ROTARİ MATKAPLARIN SEÇİMİNDE DİKKAT EDİLECEK ÖNEMLİ PARAMETRELER

CRUCIAL PARAMETERS TO BE CONSIDERED FOR SELECTION OF ROTARY TRICONE BITS

Ömür Acaroğlu^{a,*}, Selma Ünlü^{b,**}, Burcu Hasipek^{c,***}

^a İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

^b ETİMADEN Bor İşletmeleri, Kütahya, TÜRKİYE

^c TKİ Garp Linyitleri İşletmeleri, Kütahya, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 19 Şubat / February 2020
Kabul Tarihi / Accepted : 29 Eylül / September 2020

Keywords:

Üç konili rotari matkaplar,
 Rotari delme yöntemi,
 IADC,
 Delme hızı,
 Matkap aşınması,
 Delme işlemi maliyeti.

ÖZ

Açık ocak madenciliği delme patlatma işlerinde yaygın olarak kullanılan matkap türlerinden biri de üç konili matkaplardır. Her ne kadar bu matkapların seçiminde genellikle IADC kodları kullanılsa da matkapların delme hızı ve dayanımına birçok parametre etki etmektedir. Günümüzde niteliksiz ürünlerin yaygınlaşmasından dolayı kullanıcılar matkap ömrünü artırmak için yüksek IADC kodlarında seçim yapma eğilimindedir. Bu ise delme hızını düşürmekte ve delme maliyetini artırmaktadır. Matkap seçiminde; öncelikle matkabın üretim aşamasında doğru malzeme kullanılmış ve uygun metalurjik süreçlerden geçmiş olmasına ayrıca matkap tasarımının formasyon şartlarına uygun olup olmadığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Kullanım aşamasında ise verimliliği artırmak için baskı kuvveti ve dönme hızı gibi çalışma parametrelerine ait değerler formasyon özelliklerine göre belirlenmelidir. Matkap seçiminde sadece matkap maliyeti değil, bütün olarak delme işlemi maliyeti dikkate alınmalıdır.

ABSTRACT

Tricone bit is the most common used type of rotary drilling bits in surface mining. Even though IADC is usually used to select these bits, there are many parameters which affect drilling rate and durability of them. Users have tendency to select bits with higher IADC codes, since unqualified productions are becoming widespread in these days. This causes decreasing drilling rates and increasing costs. Firstly, a bit should be produced with right materials and proper metallurgical processes. Design parameters are also important to be appropriate for the formation drilled. In order to increase performance of selected bit, value of working parameters such as feed force and rotary speed should be defined according to formation properties during the operation. Users should consider not only bit cost but also cost of all drilling operation when they select proper bit.

Anahtar sözcükler:

Tricone bits,
 Rotary drilling method,
 IADC,
 Drilling rate,
 Bit wear,
 Cost of drilling operation.

* Sorumlu yazar / Corresponding author : acaroglu@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4634-3853>

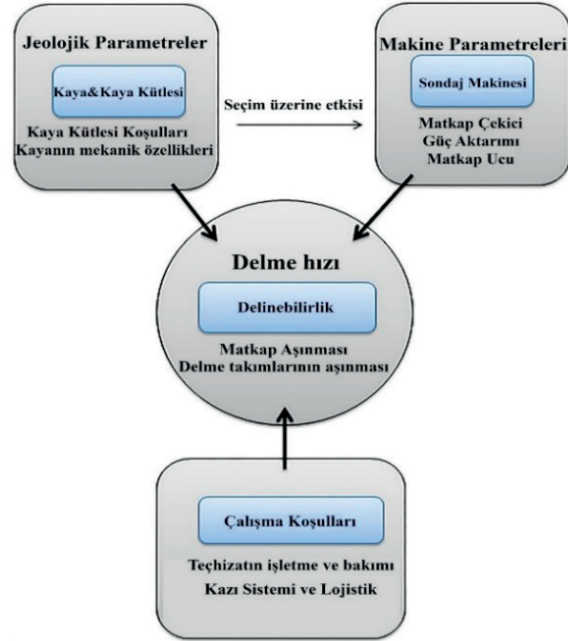
**selmaunlu@etimaden.gov.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4623-1181>

***hasipekb@tki.gov.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8174-7362>

GİRİŞ

Delme patlatma işlemleri maden ve inşaat sektöründe arama, hazırlık ve üretim aşamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Delme yöntemleri rotari (döner) ve rotari darbeli olmak üzere genel olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Darbeli delme yöntemleri patlatma deliklerinde 1949 yılına kadar yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Petrol üretiminde kullanılan üç konili matkaplar, bu tarihten itibaren rulmanlarından basınçlı havanın geçirilmesiyle birlikte patlatma delikleri açma işleminde de kullanılmaya başlanmıştır. Rotari delicilerde üç konili matkapların yanında açık ocak madencilğinde daha etkili patlayıcıların kullanılmaya başlanmasıyla birlikte yüksek üretimler söz konusu olmaya başlamıştır (Jimeno ve Carcedo, 1995; Ersoy, 2008).

Günümüzde üç konili matkaplar rotari delme yönteminde en yaygın kullanılan matkaplardır. Yapılan çalışmalar genel olarak delme hızı, enerji ihtiyacı ve dayanım gibi performans parametreleriyle ilgilidir ve delinebilirliğe etki eden birçok parametre vardır. Şekil 1’de gösterildiği gibi bunlar, kayaçların mekanik ve kütsel özellikleri, matkap ile makina özellikleri ve çalışma koşulları şeklinde üç ana başlık altında sınıflandırılabilir



Şekil 1. Delinebilirliğe etki eden parametreler (Thuro ve Spaun, 1996)

(Thuro ve Spaun, 1996). Delme hızının tahmin edilmesi, projelerin zamanında tamamlanması ve maliyetlerinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir. Matkapların dayanımını ise kayaçların dayanımı, özellikle kuvars vb. aşındırıcı minerallerin oranı ile uygulanan devir sayısı ve baskı kuvveti gibi işletim parametrelerinden etkilenmektedir (Jimeno ve Carcedo, 1995; Ersoy, 2008; Thuro ve Spaun, 1996).

Kayaçların delinebilirliği ve rotari sondaj makinelerinin performans parametrelerinin tahminiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Yapılan bir laboratuvar çalışmasında, delme hızının geçirimsiz dolomit kayaçlarına uygulanan baskı kuvveti ve dönme gücüyle birlikte arttığı tespit edilmiştir (Rowley vd., 1961). Başka bir çalışmada delme işlemlerindeki sorunların doğru tahminlerle çözülebileceği belirtilip, sert formasyonlarda delme işlemi söz konusu olduğunda kayaçların aşındırıcılık özelliklerinin belirleyici etken olduğu vurgulanmış ve belirli kayaç koşulları için delme hızı ve matkap aşınması tahmini yapılmıştır (Thuro, 1997). Delicilerin performansını önceden tahmin edebilmek için, çeşitli arazilerden alınan örneklerin tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı, darbe dayanımı ve Schmidt çekici dayanımı değerleri ile delici performans parametreleri arasındaki bağıntılar çok katlı regresyon analizi ile bulunmuştur (Kahraman, 1997b). Geniş kapsamlı bir laboratuvar çalışmasında ise birçok kayaç türünün ayrıntılı fiziksel ve mekanik özellikleri verilerek bu özelliklerin delme performansına etkileri belirlenmiştir (Rao vd., 2002). Delinebilirlik ile kayaçların kırılma parametreleri arasındaki bağıntının araştırıldığı bir çalışmada ise kırılma ile ilgili iki ayrı formül üzerinden yorum yapılmış ve sonuç olarak kayaçların basınç ve indirekt çekme dayanımı toplamalarının yarısını ifade eden kırılma değerinin daha iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir (Altındağ, 2002). Hong Kong'taki bir çalışmada jeoteknik bilgiler, mühendislik uygulamaları ve sondaj verileri kullanılarak kayaçların mekanik özelliklerinin belirlenebileceği ifade edilmiştir (Yue vd., 2003). Kesme ve delme deneylerinin yapıldığı bir çalışmada elde edilen spesifik enerji değerleri ile bir model kurulmaya çalışılmış ve bu değerlerin kırılma ile ilişkisi araştırılmıştır (Atıcı ve Ersoy,

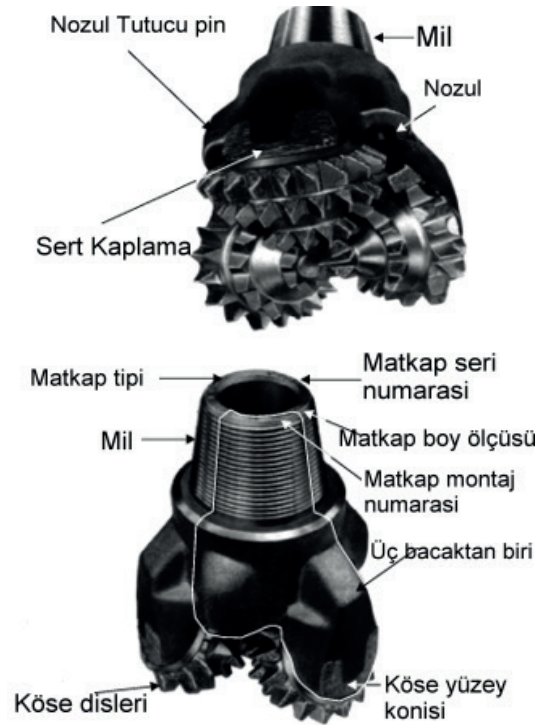
2008). Bir çalışmada ise delme maliyetlerin azaltılması için doğru matkap seçiminin önemini vurgulanmış, farklı IADC kodlarında matkaplar kullanılarak matkap modellemesi yapılmış ve ilerleme hızları tahmin edilmeye çalışılmıştır (Hareland vd., 2010). Delinebilirlik indeksi ile kayaların kırılabilirlik parametreleri arasındaki ilişkinin araştırıldığı bir çalışmada, 32 farklı kayaç örneğinin tek eksenli basınç dayanımı ve çekme dayanımı değerlerinden kırılabilirlik değeri hesaplanmış ve Siever's minyatür delme modelinden elde edilen değerlerle kayaların basınç ve indirekt çekme dayanımı toplamalarının yarısını ifade eden kırılabilirlik değerinin en yüksek ilişkiyi verdiği belirlenmiştir (Yaralı ve Kahraman, 2010). Bir bakır madeninde kayaların tek eksenli basınç dayanımı, d_{30} , Schmidt çekici dayanımı ve pirit miktarı belirlenmiş ve bunların spesifik kayaç delinebilirliği değerleriyle ilişkisi araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada matkap çapı ve şeklinin spesifik kayaç delinebilirliği değerine etki etmediği belirtilmiştir (Alireza vd., 2012). TKİ Orhaneli Kömür İşletmeleri'nde üç farklı matkap üreticisine ait aynı matkap tipi ile delme hızı ölçümleri ve matkapların aşınmaları takip edilmiştir. Bu çalışmada teorik veya amprik modellerin kullanılmasının yanı sıra matkapların yerinde denenip karşılaştırılmasının daha doğru sonuç verebileceği ifade edilmiştir (Bulut ve Acaroglu, 2014). Yatay ve dikey yönde delme hızıyla ilgili olan bir çalışma mermer ocaklarında gerçekleştirilmiştir. Delme hızına etki eden faktörler ve kayaların tek eksenli basınç dayanımı, darbe dayanımı, kırılabilirlik indeksi ve P-dalga hızı değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin dikey delme işlemiyle daha alakalı olduğu gözlemlenmiştir (Demirdağ vd., 2014). Matkapların ilerleme hızı, aşınma ve spesifik enerji değerleri Nijerya'daki beş farklı gnays ve kireçtaşı örneğinde ölçülmüş ve bu parametrelerin delme şartlarını ve performansını etkileyen en önemli parametreler olduğu belirtilmiştir (Babatunde ve Ademola, 2014). Bir açık ocak demir madeninin on bir farklı zonu kayaç delinebilirlik indeksine göre sınıflandırmaya çalışılmış, kaya kütlelerinin yapısal parametreleri ve sondaj deliklerine ait net delme süreleri kaydedilmiş ve ocaktan alınan kayaç örneklerine laboratuvar deneyleri uygulanmıştır. Çalışılan maden alanının altı zonu

kayaç delinebilirlik indeksine göre sınıflandırılmış ve yeni bir ilerleme hızı modeli bulunarak önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Ataei vd., 2014).

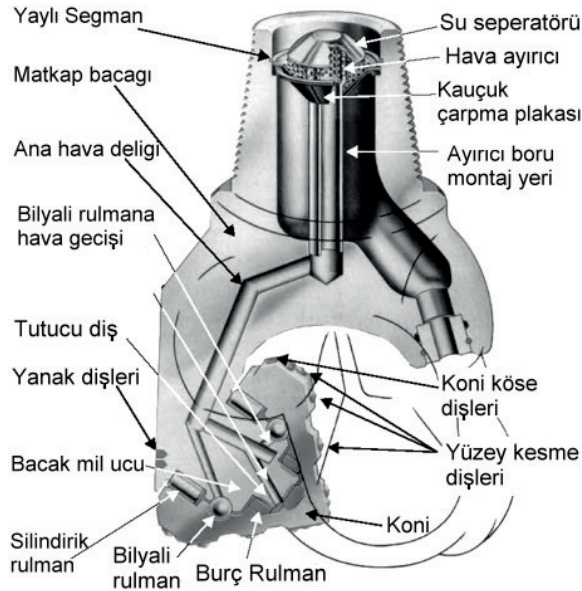
1. ÜÇ KONİKLİ ROTARİ DELİCİ MATKAPLAR

Üç konili matkaplar çelik dişli ve tungsten karbid dişli olmak üzere ikiye ayrılırlar. Çelik matkaplarda dişler konik kafaların makinadan geçirilmesiyle üretilirken, tungsten karbid dişli matkaplarda dişler sonradan konik kafalara yerleştirilirler ve bu nedenle insert matkaplar olarak da adlandırılırlar. Benzer çalışma koşullarında insert matkaplar çelik matkaplardan 3 ile 9 kat daha yüksek performansa sahiptirler.

Şekil 2'de üç konili matkabı oluşturan ana parçalar ve isimleri gösterilmiştir. Üç konili matkaplar, farklı amaçlı delme işlerine göre özellikle yatak tipleri açısından değişik tasarımlara sahip olabilirler. Genellikle açık ocak patlatma deliklerinde rulmanları hava soğutmalı tipler kullanılmaktadır. Şekil 3'te gösterilen hava soğutmalı nozullu (jet) matkaplarda basınçlı havanın en az %30'u rulmanlara gönderilerek gerekli soğutma sağlanmaktadır (Gokhale, 2011).



Şekil 2. Üç konili matkabı oluşturan parçalar (Gokhale, 2011)



Şekil 3. Hava soğutmalı üç konili matkapların yapısı (Gokhale, 2011)

Çizelge 1. Formasyon sertliği

| Sayı | Açıklama (Matkap tipi ve formasyon) |
|------|---|
| 1 | Yumuşak formasyonlar için çelik dişli matkap |
| 2 | Orta sertlikte formasyonlar için çelik dişli matkap |
| 3 | Sert formasyonlar için çelik dişli matkap |
| 4 | Yumuşak formasyonlar için tungsten karbid matkap |
| 5 | Orta yumuşak formasyonlar için tungsten karbid matkap |
| 6 | Orta formasyonlar için tungsten karbid matkap |
| 7 | Orta sert formasyonlar için tungsten karbid matkap |
| 8 | Sert formasyonlar için tungsten karbitli matkap |

İnsert ve çelik dişli üç konili matkaplar aynı tasarım parametrelerine sahip olup, bunlar uluslararası sondaj üreticileri birliği tarafından belirlenen

ve IADC olarak adlandırılan 4 haneli kodlarla tanımlanmaktadır. İlk ve ikinci haneler Çizelge 1'de 1'den 8'e kadar ve Çizelge 2'de 1'den 4'e kadar gösterilen rakamlardan oluşmakta ve formasyon sertliğini ifade etmektedir. Üçüncü hane Çizelge 3'de gösterilen rakamlarla ifade edilen yatak tipini, Çizelge 4'de gösterilen ve harfle ifade edilen son hane ise matkabın spesifik özelliklerini göstermektedir (McGehee vd., 1992).

Çizelge 2. Formasyon sertliği

| Sayı | Açıklama (İleri formasyon ayarlamaları) |
|------|---|
| 1 | Yumuşak formasyonlar |
| 2 | Orta sertlikte formasyonlar |
| 3 | Sert formasyonlar |
| 4 | Çok sert formasyonlar |

Çizelge 3. Yatak tipi

| Sayı | Açıklama (Yatak/Gövde koruması tipi) |
|------|--|
| 1 | Standart açık |
| 2 | Hava soğutmalı standart açık |
| 3 | Tungsten karbid korumalı standart açık |
| 4 | Sızdırmaz rulman |
| 5 | Tungsten karbid eklentili sızdırmaz rulman |
| 6 | Sızdırmaz journal (mil) |
| 7 | Tungsten karbid eklentili sızdırmaz rulman |

Çizelge 4. Matkabın spesifik özellikleri

| Harf | Açıklama |
|------|-----------------------------------|
| A | Havalı sondaj |
| R | Özel sızdırmazlık elemanı |
| C | Merkezi nozul |
| S | Standart çelik dişli matkap |
| D | Sapma kontrolü |
| E | Uzatılmış nozullar |
| G | Yanak ve gövde koruması |
| Z | Diğer şekilli tungsten karbid diş |
| J | Saptırma jeti |

Üç konili matkaplar düşük devirde yüksek baskı kuvvetiyle dolayısıyla yüksek torklarda çalışan

matkaplardır. Eşitlik 1-3' belirli bir formasyona uygulanacak maksimum, minimum ve optimum baskı kuvvetini Eşitlik 4 ise bir matkapın kaldırabileceği yükü vermektedir. Çizelge 5'te gösterilen devir hızı (RPM) değerleri ise formasyonun sertliğine ve matkap çapına göre değişmektedir (Jimeno ve Carcedo, 1995).

$$E_{min} = 5.1 * G_C * D \quad (1)$$

$$E_{max} = 2 * E_{min} \quad (2)$$

$$E_{ort} = (E_{max} + E_{min}) / 2 \quad (3)$$

$$E_{Limit} = 57 * D^2 \quad (4)$$

G_C = Kayacın basınç dayanımı (MPa)

D = Üç konili matkap çapı (cm)

E_{min} = Uygulanması gereken minimum baskı kuvveti (kg)

E_{max} = Uygulanması gereken maksimum baskı kuvveti (kg)

E_{ort} = Uygulanması gereken ortalama baskı kuvveti (kg)

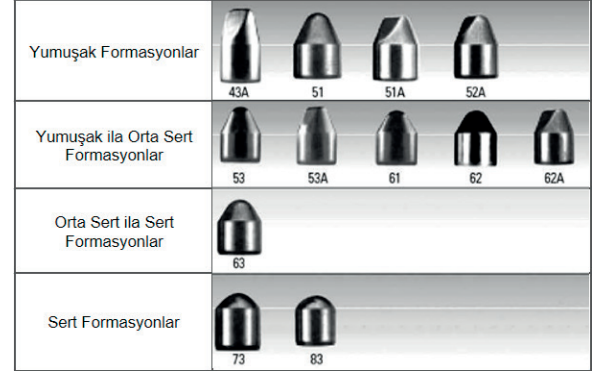
E_{limit} = Uygulanması gereken limit baskı kuvveti (kg)

Çizelge 5. Matkap RPM değerleri

| Kayaç Tipi | Devir Hızı (RPM) (devir/dak) |
|------------|---------------------------------|
| Yumuşak | 75-160 |
| Orta | 60-80 |
| Sert | 35-70 |

Üç konili matkaplarda çelik ve insert diş tasarımları da delme verimliliğini etkilemektedir. Çelik uçlu matkaplarda bir dişin kenar açıları küçüldükçe yükseliği artar ve yumuşak formasyonlarda uzun dişler körelmeden uzun süre iri parçalar halinde delme sağlarlar. Daha sert kayaçlar için dişlerin yükseklik ve kenar açılarının hızlı aşınmalarını önlemek için azaltılması gerekmektedir. Aynı şekilde insert dişli matkaplardaki insertler de Şekil 4'te gösterildiği gibi farklı şekillerde üretilirler (Gokhale, 2011). Geniş uç açısı diş hem dayanıklılık hem de aşınmaya karşı direnç verir, fakat ilerleme hızında düşüşe neden olurlar. Formasyon sert olmasa dahi konik kafaların köşelerinde ve matkap yanlarında küresel şekilli dişler, hızlı aşınmayı önlemek için kullanılırlar.

Matkap ve diş tasarım parametrelerinin kayaçların sertliğine göre nasıl değiştiği Şekil 5'de gösterilmiştir (Gokhale, 2011).



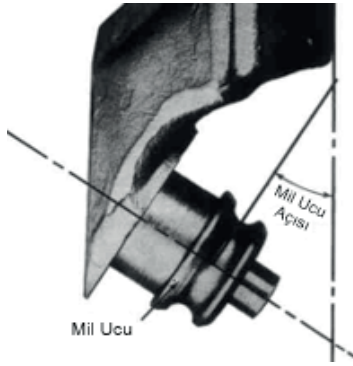
Şekil 4. IADC'ye göre insert şekilleri (Gokhale, 2011)

| Matkap Tipi → | | Yumuşak | Orta | Sert | Ekstra Sert |
|-----------------------|-----------------------------|---------|------|------|-------------|
| Temel Tasarım | Offset | | | | |
| | Mil Ucu Açısı | | | | |
| Kesme Yüzeyi Tasarımı | Sıyırma Etkisi | | | | |
| | Öğütme Etkisi | | | | |
| | Diş Derinliği | | | | |
| | Diş Uzaklığı | | | | |
| Dayanım | Dahili Diş Açısı | | | | |
| | Yatak Yük Dayanımı | | | | |
| Metalurji | Karbonlanmış Doku Derinliği | | | | |
| | Sert Kaplama Diş | | | | |
| | Köşe Kaplama Ölçüsü | | | | |

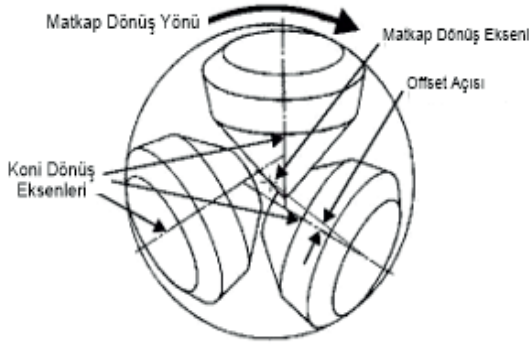
Şekil 5. Formasyon tiplerine göre diş ve matkap tasarım özellikleri (Gokhale, 2011)

Ayrıca Şekil 6'da gösterilen mil (Journal) ve Şekil 7'de gösterilen ofset açıları da delme performansını etkilemektedir. Şekil 5'de

gösterildiği gibi kayaçların sertliği arttıkça daha yüksek mil açıları ve daha düşük ofset açıları kullanılır. Ayrıca üç konili matkapların her bir konik kafası 2 ayrı konikten oluşur. Sert formasyonların kazısı söz konusu olduğunda dıştaki konik kafa daha büyük yapılı ve böylece daha büyük rulmanların yerleştirilmesi sağlanır. Böylece bu matkaplar, daha yüksek baskı kuvvetlerine dayanarak daha sert kayaçları kazabilirler. Matkapların tasarım özellikleri değiştikçe yaptıkları kesme şekli de değişmektedir. Şekil 5'den görüleceği gibi yumuşak kayaktan sertte doğru gidilirken kesme şekli de sıyırma şeklinden öğütmeye dönüşmektedir (Gokhale, 2011; Ersoy, 2008; Kahraman, 1997(a)).



Şekil 6. Üç konili matkaplarda mil ucu (journal) ve mil ucu açısı (Gokhale, 2011)



Şekil 7. Ofset açısı (Gokhale, 2011)

Her ne kadar matkap seçimi IADC kodları göz önüne alınarak yapılsa da, matkapın malzeme özellikleri ve geçirmiş olduğu metalurjik süreçler, delme performansına ve dayanım süresine oldukça fazla etki etmektedir. Matkaplar konik kafalar, rulmanlar ve dişler gibi değişik parçaların bir araya getirilmesiyle üretildiğinden bu parçaların malzemeleri de farklı özellikte olabilmektedir. Matkap üretiminde ilk aşama

her bir parça için uygun malzemeyi seçmektir. Örneğin, çelik parçalarının birleşimine katılan maddelerin tolerans aralığı dar olup özenle seçilmeleri gerekmektedir.

Aynı şekilde tungsten karbidler çok sert ve aşınmaya dayanıklı bir malzeme olsa da kırılabilirlik özelliği yüksektir ve kobalt katılması gerekmektedir. Kobalt miktarı %4 ile %12 arasında değişir. Dişlerin dış kısmında kobalt oranı az iken iç kısmında daha fazladır. Bu da dişlerin aşınmaya karşı direncini artırmaktadır. Hatta insertlerin dış tabakasına silikon karbit, boron nitrat gibi bileşenler de katılabilmektedir. Modern matkaplarda matkapların köşeleri tungsten karbit malzeme ile kaplanıp üzerlerine 2-3 mm kalınlığında düz elmas dişler eklenebilmektedir (Ersoy, 2008).

Karbürizasyon ve bu aşamada yapılan kaplama işlemleri de matkap üretiminde önemli metalurjik süreçlerdendir. Özellikle konik kafalar ve rulmanların yüzeylerinin aşınmaya dayanımını artırabilmek için belirli bir sıcaklık değerinde karbonlu gazlarda bekletilmesi, karbonun yüzeye nüfus ederek yüzeyi sertleştirilmesi sağlanmaktadır. Fakat matkapın bazı bölgeleri için bu istenmez ve bu nedenle matkap karbüre edilmeden önce bu kısımlar oxyacetylene alevi (coating) ile kaplanır. Matkaplarda görece koyu bölgeler karbürize edilmiş kısımları göstermektedir. Şekil 5'de formasyon değiştikçe karbonlaşmış doku derinliği, sert kaplama dış miktarı, köşe kaplama ölçüsü gibi özel metalurjik işlemlerin nasıl değiştiği belirtilmiştir (Gokhale, 2011).

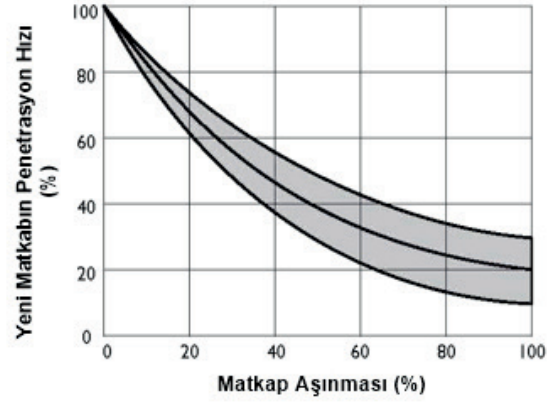
Matkap üretimindeki metalurjik süreçler oldukça önem arz etmekte olup son kullanıcının performansa ait gözlemleri kaçınılmaz ve neredeyse tek denetleme yöntemidir. Günümüzde matkapların performans garantisi matkap satışının kaçınılmaz özelliğidir. Şekil 8'de görüldüğü gibi matkaplardaki aşınma oranı %30'a çıktığında performanstaki kayıp %50'lere çıkmaktadır. İlerleme hızının yakıt maliyetine etkisi, matkap maliyetinden çok daha fazla olduğu için matkapların aşınma oranlarının ve şekillerinin sürekli takip edilmesi gerekmektedir.

Matkaplarda yüksek hızlı aşınmalar kalitesiz malzeme, yanlış tasarım, formasyona uygun olmayan matkap seçimi ve yanlış kullanımdan kaynaklanabilmektedir. Kullanımdan kaynaklanan hataların ortadan kaldırılması, ilerleme hızının artırılması ve sonraki alımlarda doğru ürünlerin seçilmesi için matkapların sürekli gözlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, aşınmaların

sınıflandırıldığı ve detaylı olarak derecelendirildiği çeşitli tablolar vardır. Aşınmaları genel olarak dişlerde, konik kafalarda, rulmanlarda ve matkap gövdesinde olmak üzere 4 ana sınıfa ayırabiliriz. Bu ana başlıklar altındaki aşınma tipleri Çizelge 6'da verilmiştir (McGehee vd., 1992; Gokhale, 2011).

Çizelge 6. Üç konili matkaplarda aşınma tipleri

| Diş ve konik kafa durumları |
|--|
| Diş kırılması |
| Konilerden bir veya birkaçının dönmeyerek sürüklenmesi |
| Koni uçlarının tamamen aşınması |
| Koni dış yanaklarının aşınması |
| Koni dış yanaklarının tükenmesi |
| Koni dış yanaklarının kırılması |
| Koni kaplaması durumları |
| Eksenli kırılma |
| Çevrenin kırılması |
| Uç nokta kırılma |
| Koni engellenmesi – Dip |
| Koni engellenmesi – Orta |
| Koni engellenmesi – Uç Burun |
| Eksenli çatlama |
| Çevrenin çatlaması |
| Erimiş (aşınmış) koni kopması |
| Dönme ve yataklanma durumları |
| Rulman sorunları ve keski bağlantı zayıflığı |
| Kırılmış pin |
| Kırılmış rulmanlar |
| Sıkışmış koni |
| İçsel aşınma |
| Koni düşmesi |
| Rulman düşmesi |
| Uç yatak sorunu |
| Uç yatak kaybı |
| Dışsal itme |
| Matkap gövdesi durumları |
| Yamulmuş bacıklar |
| Zarar görmüş matkap |
| Yanak kırılması |
| Yanak aşınması |



Şekil 8. Üç konili matkaplarda delme hızları ve matkap aşınmaları arasındaki ilişki (Gokhale, 2011)

2. TKİ GARP LİNYİTLERİ KÖMÜR İŞLETMESİNDE KULLANILAN ÜÇ KONİLİ MATKAPLARIN PERFORMANSLARI

2.1. Türkiye Kömür İşletmeleri Garp Linyitleri İşletmesi

Türkiye Kömür İşletmeleri (TKİ) Garp Linyitleri Müessesesi (GLİ) Kütahya ili Tavşanlı ve Domaniç ilçe sınırları içerisinde kalan sahalarında açık ocak ve yeraltı ocaklarıyla faaliyet göstermektedir. Türkiye linyit rezervinin yaklaşık %4,6'sı Tunçbilek'te bulunmaktadır. Türkiye'deki linyit üretiminin yaklaşık %7,5'i GLİ'den karşılanmakta olup, ülkemizin en kaliteli ve en büyük linyit üreticilerindedir.

GLİ Açık Ocak İşletmelerinde kömür üretimine yönelik olarak delme patlatma ardından kepçe+kamyon ve dragline örtü kazısı yöntemi uygulanmaktadır. Dragline kazısına olanak verecek şekilde panoların önce kepçe ve kamyon ile örtü kazısı yapılmakta ve dragline dilimleri oluşturulmaktadır. GLİ Açık Ocaklarında yılda yaklaşık 3300000 ton linyit üretim gerçekleştirilmektedir.

Tunçbilek Kömür Havzası'nda kömür üzerindeki örtü tabakası delme patlatma yöntemiyle gevşetilmekte ve genel olarak tek bir patlatmada 20 delik açılmaktadır. Delik araları 8 m ve delik uzunlukları 15 m uzunluğundadır. Kuru deliklerde amonyum nitrat-mazot karışımı, sulu deliklerde ise emulan kullanılmaktadır.

Tunçbilek havzasında kömür üretimi miyosen yaşlı M2 olarak adlandırılan 400-450 metrelik birimin içinde bulunan 5-20 metrelik linyit tabakasında gerçekleştirilmektedir. M2 birimindeki kayaçlar marl, killi siltaşı, siltaşı, miltası ardalanması şeklindedir. Formasyon belirgin tabakalar gösterir, yer yer laminalıdır. Yer yer merceksel kumtaşı-konglomera ara katkısı da içermektedir (MTA, 1991).

2.2. Deliciler ve Üç Konili Matkaplar

Tunçbilek Kömür Havzası'nda 3 adet DM50XL1050 model ve 5 adet DM50XL900 model delici makineleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada ölçümler, Şekil 9'da gösterilen 3 adet DM50XL900 model delik delme makineleri ile yapılmıştır. Çizelge 7'de bu makinelerin genel özellikleri verilmiştir (Drilling Catalogue, 1985).



Şekil 9. Tunçbilek Kömür Havzası'nda kullanılan DM50XL900 model delicilerden biri

İşletmede delik delmek için 9" (22,86 cm) çapında 522 ve 622 IADC kodlu üç konili matkaplar kullanılmaktadır. Bu matkapların performanslarını analiz edebilmek için, üretimin aktif olarak yapıldığı 6 farklı bölgede ölçüm yapılmıştır. Her bir bölgedeki kayaçların mekanik özelliklerini deneylerle belirlemek amacıyla numuneler alınmıştır. Çizelge 8'de bölgelere göre alınan kayaçların fiziksel, mekanik özellikleri ve elek analizi parametreleri verilmiştir. Bu bölgelerde 1 adet 522 ve 3 adet 622 IADC kodlu matkabın

delme hızları ölçülmüş, aşınma tipleri ve süreleri belirlenmiştir. Çizelge 9'da ise bu altı bölgede ölçülen delme hızları, ana pompa ve hava basınçları, uygulanan baskı kuvveti değerleri verilmiştir (Ünlü, 2017).

Çizelge 7. Delici makinelerinin genel özellikleri

| Özellikleri | Değerleri |
|-------------------------|--------------------------|
| Marka | IngersollRand |
| Tipi | Paletli |
| Modeli | DM50XL900 |
| İmal Yılı | 1985 |
| Baskı Kapasitesi | 0-22.680 kg |
| Aşağı Doğru Baskı Hızı | 31 m/dak |
| Yukarı Doğru Çekme Hızı | 48,5 m/dak |
| Dönme Hızı | 0-130 dev/dak |
| Maksimum Tork | 9706 Nm |
| Hava Kompresörü Debisi | 25,5 m ³ /dak |
| Pompa Kapasitesi | 0-393 lt/dak |
| Motor Gücü | 298400 W |
| Motor Devri | 2000 dev/dak |
| Maksimum Delme Çapı | 9 inç |
| Tij uzunluğu | 7,6 m |

Çizelge 9'dan görüleceği üzere bölgelerdeki kayaçlar arasında fiziksel ve mekanik olarak çok büyük bir fark olmadığı belirlenmiştir. Bu durum delme hızına da yansımış ve hızlarda benzer değerler elde edilmiştir. Hız değerleri yumuşak ve orta sertlikteki formasyonlar için kabul edilebilir büyüklüktedir. Ayrıca çizelgede verilen makine parametrelerine ait çalışma aralıkları çok uzun senelerdir benzer şekilde uygulanmaktadır. Ancak, bu çalışmada ilginç olan sonuçlar matkapların aşınmalarını analiz ederken elde edilmiştir. Her bir matkaptan daha önceki yıllara göre ortalama 10 000 m kazı süresi beklenirken, 522 IADC kodlu matkap 419,5 m, 622 IADC kodlu matkaplar ise 3000, 386 ve 150 m delme yapabilmiş ve sonrasında kullanılamaz duruma gelmişlerdir. Şekil 10'da gösterildiği gibi matkapların hepsinde rulmanların dağılımı olduğu tespit edilmiştir (Ünlü, 2017).

Şekil 10'dan görüleceği üzere matkabın dişlerinde çok az aşınma olmuştur. Prensip olarak aşınma, matkap dişlerinde uniform olarak beklenirken, matkaplar ortalama aşınma sürelerinin çok altında bir zamanda rulmanlardaki aşınmadan

Çizelge 8. Tüm bölgelerden alınan numunelere ait deney sonuçlarının ortalamaları

| No | Deneilerin Ortalamaları | I | II | III | IV | V | VI |
|----|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Nem (%) | 1,33 | 0,86 | 1,09 | 1,08 | 1,14 | 1,36 |
| 2 | Yoğunluk (gr/cm ³) | 2,13 | 2,16 | 2,24 | 2,23 | 2,29 | 2,18 |
| 3 | Darbe Dayanımı Deneyi (%) | 68,74 | 72,65 | 65,89 | 66,73 | 63,87 | 67,18 |
| 4 | Nokta yük deneyi (MPa) | 34,30 | 34,18 | 28,73 | 48,53 | 32,70 | 39,05 |
| 5 | Çekme Dayanımı Deneyi (MPa) | 5,71 | 4,06 | 4,41 | 4,33 | - | - |
| 6 | Tek Eksenli Basınç Dayanımı (MPa) | - | - | 33,77 | - | - | - |
| 7 | Elastisite (GPa) | - | - | 8,78 | - | - | - |
| 8 | Schmidt Çekici Deneyi (MPa) | 25,80 | 31,60 | - | 34,60 | - | 27,40 |
| 9 | Elek Analizi (d ₅₀) (mm) | 0,82 | 1,60 | 0,96 | 1,27 | 1,44 | 1,45 |

Çizelge 9. Delici makine parametrelerine ait ölçümlerin ortalamaları

| Makine Parametreleri | | | | |
|----------------------|---|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------|
| Bölgeler | Ana Pompa Basıncı (kg/cm ²) | Baskı Basıncı (kg/cm ²) | Hava Basıncı (kg/cm ²) | Delme Hızı (m/dk) |
| I | 110 | 127,5 | 5,5 | 1,75 |
| II | 118 | 119 | 5,5 | 1,74 |
| III | 127,5 | 125 | 5,5 | 1,54 |
| IV | 120 | 119 | 6,6 | 1,32 |
| V | 160 | 140 | 5 | 1,41 |
| VI | 118,8 | 135 | 5,5 | 1,70 |

dolayı kullanılmaz duruma gelmişlerdir. Bu sorun, matkapların uygun koşullarda ve doğru malzemelerle üretilip üretilmediği sorusunu gündeme getirmiştir. Bu nedenle işletmede kullanılmış 622 IADC kodlu matkaplar markalarına göre sınıflanmış ve kazı metrajlarına bakılmıştır. Değişik markaların ortalama delme metrajlarının verildiği Çizelge 10'dan da görüleceği üzere aralarında çok büyük farklar vardır.



Şekil 10. GLI'de üç konili matkapların aşınma tipi

Çizelge 10. Farklı matkap üretici firmalara ait 9 inç çaplı ve 622 IADC kodlu matkapların ortalama delme metrajları

| Matkap üreticileri | Matkapların performansları (m/matkap) |
|--------------------|---------------------------------------|
| A | 12017 |
| B | 9324 |
| C | 7124 |
| D | 5623 |
| E | 4700 |

Ortalama sertlikte ve kendi içinde büyük değişimlerin olmadığı bir formasyonda, aynı IADC kodlu ve çaplı matkapların delebildikleri mesafelerin bu kadar farklı olması, matkapların çok farklı kalitelerde üretilebildiğini göstermektedir. Özellikle son yıllarda düşük nitelikli ürünlerin değişik isimler altında sektöre sunulması bu konuda dikkatli olunması ve ciddi önlemler alınmasını gerektirmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üç konikli matkaplar rotari sondaj yönteminde en çok kullanılan matkaplardır. Delme patlatma deliklerinde de yaygın olarak kullanılan bu matkaplara ilişkin bilimsel çalışmalar, delme hızı ve dayanım süreleri gibi performans parametrelerini iyileştirmek üzerinedir. Performans parametrelerine bir çok değişken etki etmekte olup, formasyonun dayanım ve aşındırıcılık özellikleri, matkap ve delici özellikleri ve çalışma koşulları olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir.

Üç konik kafalı matkaplar genel olarak IADC kodlarına göre sınıflandırılmaktadır. Kullanıcılar matkap seçimlerini çoğunlukla bu kodlara göre yapmaktadırlar. IADC kodları matkabın hangi formasyon tipi için uygun olduğu hakkında genel bilgi vermektedir. Ancak matkap tasarımı ve üretimiyle ilgili çok fazla detay vardır. Özellikle matkapların yapımında kullanılan malzemeler, metalurjik süreçlerin kalitesi ve matkap tasarım parametreleri önemlidir.

Matkaplar çeşitli parçaların biraraya gelmesiyle üretilmekte ve her bir parçada farklı bileşimlere sahip malzeme kullanılabilir. Matkap üreticileri tarafından bu malzemelerin özenle seçilmemesi ve doğru metalurjik süreçlerden geçirilmemesi matkapların dayanım sürelerini çok kısaltmaktadır. Bu tip üretimin söz konusu olduğu matkaplarda kırılma, çatlama gibi ani aşınma türlerine rastlanmaktadır. Özellikle de aşırı yüke maruz kalan rulmanlarda sorun çıkmaktadır. Doğru seçilen, nitelikli üretilmiş ve uygun kullanılan matkaplarda aşınmanın dişlerde uniform olarak oluşması beklenmektedir.

Kullanıcılar, son yıllarda üretimi artan niteliksiz ürünler nedeniyle, daha dayanıklı matkaplara sahip olmak için daha yüksek IADC kodlu olanları seçme eğilimindedir. Yüksek IADC kodlu matkaplar tasarım parametreleri sert ve aşındırıcı formasyonlara göre yapılmıştır. Bu matkaplarda dişler daha küçük, kısa, sık aralıklı ve küt şekillidir. Benzer şekilde mil açıları büyük, ofset açıları küçüktür. Bu özellikleri matkap ömrünü uzatmak pahasına ilerleme hızını düşürmekte ve yakıt tüketimin artmasına neden olmaktadır. Fakat delme işleminde yakıt maliyeti matkap maliyetinin olanlarca katıdır.

Bunun yanında yapılan çalışmalar matkaplardaki %30'luk aşınmanın ilerleme hızında yaklaşık %50 oranında düşüğe sebep olduğunu göstermiştir. Bu nedenle Matkaplar kullanılırken aşınma tipleri ve oranları da yakından takip edilmelidir. Formasyona uygun seçilen, kaliteli matkabın uygun baskı kuvveti ve dönme hızında çalıştırılması yine delme hızı ve dayanım süresini artıracaktır.

Sonuç olarak, rotari delme işleminde kullanılan üç konikli matkapların delme hızı ve dayanım sürelerine birçok parametere etki etmektedir. Bütün parametreler göz önüne alarak matkap seçimi mümkün olamamaktadır. Kullanıcılar sadece matkap maliyetini değil bütün bir delme işleminin birim maliyetini dikkate almalıdır. Öncelikle kaliteli malzeme kullanılmış ve doğru metalurjik işlemlerden geçmiş ürün seçmeye çalışılmalıdır. Kullanım sırasında da delme hızının yüksek olduğu optimum baskı kuvveti ve RPM değerleri belirlenmelidir. Matkap aşınması, delme hızını düşürüp dolayısıyla yakıt tüketimini ve maliyetleri artırmaktadır. Bu nedenle aşınma tipleri ve aşınma oranları gerek kullanım sırasında ve gerekse sonrasında tespit edilmelidir. Bu süreç, kullanıcının formasyon ve çalışma şartlarına uygun, nitelikli malzeme ve proseslerle üretilmiş matkapları seçmesine ve delme hızı ve dayanım süresini yükseltip maliyetleri düşürmesine yardımcı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TKİ Garp Linyitleri Açık Ocak işletmelerinde gerçekleştirilmiş olup yazarlar GLİ çalışanlarına teşekkürü borç bilir.

KAYNAKLAR

Alireza, C., Seyed, H. K., Kouros, S., Jafar, K. H., 2012. An Estimation of the Penetration Rate of Rotary Drills Using the Specific Rock Mass Drillability Index. International Journal of Mining Science and Technology, 22, p.187–193.

Altındağ, R. , 2002. The Evaluation of Rock Brittleness Concept on Rotary Blast Hole Drills. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.

Ataei, M., Kaie, R., Ghavidel, M., Saeidi, O., 2014. Drilling Rate Prediction of an Open Pit Mine Using the

- Rock Mass Drillability Index. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 73, p.130–138.
- Atıcı, U., Ersoy, A., 2008. Correlation of Specific Energy of Cutting Saws and Drilling Bits with Rock Brittleness and Destruction Energy. *Journal Of Materials Processing Technology*, 209, p. 2602–2612.
- Babatunde, A., Ademola, B. W., 2014. Discontinuities Effect on Drilling Condition and Performance of Selected Rocks in Nigeria. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, p.603–608.
- Bulut, M., Acaroğlu Ö., Ergener, B., 2014. TKİ Bursa Orhaneli Kömür İşletmelerinde Optimum Üç Konili Matkap Seçimi. 11. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Afyonkarahisar, 7-9 Mayıs, s.269-274.
- Demirdağ, S., Sengun, N., Uğur, İ., Efe, T., Akbay, D., Altındağ, R., 2014. Variation of Vertical and Horizontal Drilling Rates Depending on Some Rock Properties in the Marble Quarries. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24, p.269–273.
- Drilling Catalogue, 1985. Driller Catalogue of Ingersoll Rand Drill Mater.
- Ersoy, A. 2008. Sondaj Tekniği ve Uygulamaları. Nobel Kitabevi, Adana.
- Gokhale, B. V., 2011. Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines. Taylor & Francis Group.
- Hareland, G., Wu, A., Rashidi, B., James, J. A., 2010. A New Drilling Rate Model for Tricone Bits and Its Application to Predict Rock Compressive Strength. *American Rock Mechanics Association*, 10, p. 206.
- Jimeno, C. L., Carcedo, F. J. A., 1995. Drilling and Blasting of Rocks. Imprint Rotterdam, A. A. Balkema.
- Kahraman, S. 1997(a). Konili Matkaplar; Seçim Kriterleri ve Sınıflandırılması. *Jeoloji Mühendisliği*, 45-56
- Kahraman, S. 1997(b). Açık İşletmelerde Uygun Delme- Patlatma Şartlarını Veren Bir Modelin Geliştirilmesi (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Maden Tetkik Arama Enstitüsü (MTA), 1991. TKİ Kurumu Kütahya-Tavşanlı-Tunçbilek-Domaniç Kömür Sahaları Jeoloji Raporu. Ankara.
- McGehee, D.Y., Dahlem, J.S., Gieck, J. C., Kost, B., Lafuze, D., Reinsvold, C.H.L., Steinkee, S.C., 1992. The IADC Roller Bit Dull Grading System. 1992 IADC / SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, Feb. 18-21, pp 819 – 827.
- Rao, K.U.M., Bhatnagar, A., Misra, B., 2002. Laboratory Investigations on Rotary Diamond Drilling. *Geotechnical and Geological Engineering*, 20, p.1-16.
- Rowley, D. S., Howe, R. J., Deily, P. H., 1961. Laboratory Drilling Performance of the Full-Scale Rock Bit. *SPE* 1545-G.
- Thuro, K., Spaun, G., 1996. Drillability in Hard Rock Drill and Blast Tunnel. *Geomechanics*, 14-2, p.1-11.
- Thuro, K., 1997. Drillability Prediction: Geological Influences in Hard Rock Drill and Blast Tunnelling. *Geol Rundsch*, 86, p.426-438.
- Ünlü, S., 2017. GLİ Açık Ocak İşletmeleri'nde Delici Makina Performansına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi (Yüksek Lisans). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yaralı, O., Kahraman, S., 2010. The Drillability Assessment of Rocks Using the Different Brittleness Values. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26, p.406–414.
- Yue, Z.Q., Lee, C.F., Law, K.T., Tham, L.G., 2003. Automatic Monitoring of Rotary-Perussive Drilling for Ground Characterization Illustrated by a Case Example in Hong Kong. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 41, p.573–612.

BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ'NE MAKALE GÖNDERİLMESİ, YAZIM KURALLARI VE YAYINA KABUL İLKELERİ

DERGİNİN AMACI VE KAPSAMI

Bilimsel Madencilik Dergisi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın bir yayını olup, 1960 yılından bu yana yayımlanmaktadır.

Dergide; yeraltı ve açık ocak işletmeciliği, cevher/kömür hazırlama ve zenginleştirme gibi madenciliğin tüm alanlarında yapılan özgün çalışmalar, eleştirel derlemeler, kısa teknik notlar ve dergide yayımlanmış yazılara ilişkin tartışmalar yer almaktadır.

Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizcedir. Yılda dört kez (Mart, Haziran, Eylül ve Aralık) yayımlanır.

Derginin amacı, maden mühendisliği mesleğinin ulusal ve uluslararası düzeyde gelişimine katkı sağlamaktır.

2. MAKALELERİN GÖNDERİLMESİ

Bilimsel Madencilik Dergisi'ne makale gönderilmesi ve/veya gönderilen makalelerin takibi sadece elektronik ortamda, <http://www.madencilik.org.tr> URL adresinden erişebileceğiniz internet sitesindeki "Makale Gönder" sekmesi üzerinden yapılmaktadır. Makale göndermeden önce yeni bir hesap açmanız ya da zaten üyeyseniz var olan hesap bilgilerinizle sisteme yazar olarak giriş yapmanız gerekmektedir.

Aşağıda tanımlanan yazım kurallarına uygun olarak hazırladığınız makalenizi "Makale Yönetim Sistemi" üzerinden "doc" ya da "docx" uzantılı Microsoft Word dokümanı olarak göndermelisiniz.

Bilimsel Madencilik Dergisi'nde yayımlanması istemiyle gönderilecek olan makalelerin; **başka bir yerde daha** önce yayımlanmamış ve eş zamanlı olarak başka bir yerde sunulmak veya yayımlanmak üzere **gönderilmemiş olması gerekmekte** olup, aşağıda sıralanan yazı kategorilerinden birinde yer almalıdır.

Özgün Yazılar: Madenciliğin herhangi bir alanında ilk kez yazarı tarafından açıklanan kuramsal ve/veya uygulamalı araştırmaları ortaya koyan yazılardır.

Derleme Yazılar: Madenciliğin herhangi bir alanında daha önce yapılmış çalışmaları eleştirel bir yaklaşımla derleyip o konuda yeni bir görüş ortaya koyan yazılardır.

Teknik Notlar: Madencilik alanında devam eden ya da planlanan bir çalışmaya ilişkin ve araştırmacılar için yararlı olabilecek tanıtıcı notlardır.

Tartışma Yazıları: Dergide daha önce yayımlanan yazılara ilişkin eleştirileri, katkıları ya da bu eleştirilere yazar tarafından verilen yanıtları içeren yazılardır.

Dergiye gönderilecek çalışmalarda, araştırma ve yayın etiğine uyulması tartışmasız bir ön koşul olarak kabul edilmektedir.

3. YAZIM KURALLARI

Makalenizi; **aşağıda tanımlanan yazım kurallarına** uygun olarak kendiniz oluşturabileceğiniz gibi, <http://www.madencilik.org.tr> URL adresindeki "Yazarlar için rehber" sekmesinin altında yer alan "**Örnek Şablon**"dan da yararlanabilirsiniz.

3.1. Yazı Karakteri

Yazılar bilgisayar ortamında Microsoft Word Programı kullanılarak **Arial 10** yazıtipi ile ve tek aralıklı yazılmalıdır. Makalenin başlığında ise **Arial 12** yazı tipi kullanılmalıdır. Başlıklar hariç koyu karakter kullanılmamalıdır.

3.2. Sayfa Düzeni

A4 kağıdı boyutlarına (21,0x29,7 cm) ayarlanmış Microsoft Word sayfası üzerindeki yazı alanı; üstten 3,5 cm, alttan 3,2 cm, soldan 2,5 cm ve sağdan 2,4 cm boşluk bırakılarak düzenlenmelidir.

Makalenin ön sayfası tek sütun olarak düzenlenmelidir. Ön sayfada, makalenin büyük harflerle yazılmış Türkçe ve İngilizce başlıkları, yazar adları ve adresleri, iletişime geçilecek yazarın e-posta adresi, Türkçe ve İngilizce öz bölümleri yer almalı, Türkçe ve İngilizce anahtar sözcükler yazılmalıdır. Yazının başlığı, kısa (en fazla 2 satır) ve konuyu en iyi yansıtacak şekilde seçilmelidir. Yazarların hepsi aynı kurum/kuruluştan ise adresleri yazar adlarının altına tek bir satır halinde yazılabilir. Eğer yazarlar farklı kurum/kuruluştan ise yazar adları a, b, c gibi üst simgelerle ayrılıp ilgili adres bilgileri verilmelidir. Yazar adresleri sadece kurum/kuruluş ismi, şehir ve ülke olarak verilmeli, cadde/sokak ismi ya da numarası gibi bilgiler yer almamalıdır. İlgili yazar mutlaka "*" üst simgesiyle tanımlanmalıdır.

Türkçe öz, uzunluğu 150 kelimeyi geçmeyecek şekilde yazının amacını, içeriğini ve sonuçlarını kısa ve öz olarak aktarmalıdır. Öz içinde kaynak bilgisi verilmemelidir. İngilizce öz, Türkçe öz ile uyum içerisinde olmalıdır. Anahtar kelime sayısı 5'ten fazla olmamalıdır.

Yazının ana metni iki sütun olarak, sütun genişlikleri 77 mm, sütunlar arası 7 mm olacak şekilde yazılmalıdır. Yazıda yer alan bölüm başlıklarından önce iki satır ve sonrasında ise bir satır boşluk, ayrıca paragraf araları ile alt başlıklarda da bir satır boşluk bırakılmalıdır. Paragraf başları sayfa kullanım alanlarının en solundan başlamalıdır. Çizelgeler ve şekiller, yazıdan 1 satır boşlukla ayrılmalıdır. Yazının toplam uzunluğu 14 sayfayı geçmemelidir. Başlangıç sayfası da dâhil olmak üzere tüm sayfalar numaralandırılmalıdır.

3.2.1. Bölüm Başlıkları

Tamamı büyük harflerle, sayfa kullanım alanının en solundan başlayarak koyu karakterler ile yazılmalıdır. Bölüm başlıkları sayısal sisteme göre numaralandırılmalıdır. Örneğin; **1.**, **2.**, ..gibi

3.2.2. Alt Başlıklar

Yazı alanının en solundan başlayarak sözcüklerin ilk harfleri büyük olmak üzere küçük harflerle koyu olarak yazılmalıdır. Alt başlıklar da sayısal sisteme göre numaralandırılmalıdır. Örneğin; **1.1.**, **1.2.**, **3.1.1.**, **3.1.2.**, ..gibi. Üçüncü derece alt başlık numaralandırılmadan italik ve koyu yazılmalıdır.

3.3. Eşitlikler

Yazının içinde eşitlik verilmek isteniyorsa Microsoft Word programında tanımlanan Ekle/Eşitlik adımlarıyla gerçekleştirilmelidir. Eşitliklerde geçen simgeler, birimleri ile birlikte açıklanmalıdır. Ayrıca, her eşitliğe yazı alanının en sağ kenarında gösterilecek bir numara verilmeli ve yazı içinde eşitliğe bu numara ile değinilmelidir. Bağlantılar, paragraf başlangıç çizgisinden başlamalıdır. Örneğin;

$$= 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}} \right) \dots \dots \dots (3.6) \text{ gibi}$$

3.4. Çizelge, Şekil ve Fotoğraflar

Şekil ve fotoğraflar renkli konulabilir ancak çözünürlüğü en az 300 dpi olacak şekilde ayarlanmalı, çizelgeler de resim olarak eklenmemelidir. Çizelgede sadece yatay çizgiler kullanılmalıdır. Çizelgeler belirtilen yazı alanının dışına taşmayacak büyüklükte olmalı ve çizelgede yer alan değerlerin birimleri (kg, m, C° gibi) verilmelidir. Çizelge, şekil ve fotoğraflar makalede verilmeden hemen önce metin içinde atıfta bulunulmalıdır. Çizelge üst yazılarının sadece baş harfi büyük olmalı ve çizelge numarası verilmelidir. Şekil ve fotoğraf alt yazıları da aynı şekilde ilk harfi büyük yazılmalıdır. Çizelge, şekil ve fotoğraf yazılarının sonuna noktalama işareti konulmamalıdır. Başka bir kaynaktan olduğu gibi alınan çizelge, şekil ya da fotoğraf varsa, alıntının yapıldığı kaynak, ilgili çizelge veya şeklin üst ya da alt yazısının

sonunda parantez içinde belirtilmelidir. Çizelge, şekil veya fotoğraf tek sütuna sığmayacak büyüklükte ise sayfayı ortalayarak ve sayfanın başında ya da sonunda verilmesi tercih edilmelidir.

3.5. Birimler ve Kısaltmalar

Yazılarda Uluslararası Birimler (SI) kullanılmalıdır. Kısaltmalar ilk kullanımda parantez içinde büyük karakterle yazılmalı ve karakterlerin arasına nokta konulmamalıdır.

Örneğin; Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) gibi.

Yazı içindeki ya da çizelgelerdeki ondalık sayılarda “,” , bin hanelerini ayırmada ise “.” kullanılmalıdır.

3.6. Kaynaklar

Yazıda değinilen bütün kaynak yazının sonunda “KAYNAKLAR” başlığı altında verilmelidir. Yazı tipi olarak Arial 9 kullanılmalıdır. Kaynaklar yazar soyadlarına göre alfabetik sırada yazılmalıdır. Yazı içinde kaynaklara değinme, soyad ve yıl biçiminde yapılmalıdır. Ancak kaynak internet ortamından alınmışsa ve/veya yazarı verilmemişse Anon ve yıl şeklinde olmalıdır. Birden fazla yazarı belli olmayan kaynak varsa Anon (a), Anon (b), Anon (c), ...olarak verilmelidir. Yazı içinde kaynaklara gönderme örnekleri ise şunlardır: (Garner, 1980), (Pekin ve Konuk, 1999), (Gaudin ve Fuerstenau, 1955), (Watson vd, 1997), (Madrigal, 1998), (Watson vd, 1997; Madrigal, 1998), (Anon (a), 1999).

Kaynaklar aşağıdaki örneklere (APA formatı) uygun biçimde yazılmalıdır.

Pekin, A., Konuk, A., 1999. Jeostatistiksel Tahmin İçin Uygun Tenör Dağılım Modelinin Belirlenmesi. Madencilik, 38 (4), 21-28.

Gaudin, A. M., Fuerstenau, D. W., 1955. Quartz Flotation with Anionic Collectors. Trans. AIME, 202, 958-964.

Watson, R. T., Kelly, G. G. , Galliers, R. D., Branncheau, J. C., 1997. Key Issues in Information Systems Management: An International Perspective. Journal of Management Information Systems, 13 (4), 91-116.

Yersel, K., 1970. Türk Madenciliğinin Sorunları. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, s. 69.

4. YAZILARIN YAYIMA KABUL EDİLMESİ

Yazarlar tarafından <http://www.madencilik.org.tr> adresinden girişi yapılan makaleler, değerlendirilmek üzere Yayın Kurulu'nca belirlenen ve o konuda uzman en az iki hakeme gönderilir. Hakem değerlendirmeleri doğrultusunda yazının doğrudan ya da bazı düzeltmeler yapılarak yayımlanmasına ya da yayımlanmamasına Yayın Kurulu'nca karar verilir. Sonuç e-posta ile yazara bildirilir. Düzeltme sürecindeki yazar-editör-hakem döngüsü, yazı içerik ve biçem olarak dergide yayımlanabilir hale gelinceye kadar tekrar ettirilebilir.

GUIDE FOR AUTHORS & PUBLICATION RULES

1. SCOPE AND AIM

Scientific Mining Journal, a publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, has been published since 1960.

The journal is a medium for the publication of original research papers, critical comprehensive reviews, and technical notes in all fields of mining engineering such as underground and surface mining, and mineral/coal processing. The journal also publishes discussion of papers which have been already published in the journal.

The languages of the journal are Turkish and English. It is published quarterly (March, June, September and December).

The objective of the journal is to contribute to the development of the profession of mining engineering at national and international levels.

2. SUBMISSION OF MANUSCRIPTS

Submission of new articles to Scientific Mining Journal and/or tracking of submitted articles can only be done electronically via the “Submit Your Paper” tab on the internet site, which can be accessed at <http://www.mining.org.tr>.

Before submitting your article, you are required to register with a new account or, if you are already a member, sign in as an “author” with your existing account information.

You have to submit your article prepared in accordance with the following writing instructions as a “Microsoft Word document” with “doc” or “docx” extension via “Online Paper Management System”.

Papers submitted for publication must not have been published elsewhere, either in whole or in part or under a different title or different authorship, and it must not concurrently be under review for publication elsewhere. Complying with the research and publication ethics is considered an indisputable precondition to be published.

3. GUIDELINE FOR PREPARATION OF PAPERS

You have to create your paper according to the writing instructions described below, and the “Template” under the “Guide for Authors” section at <http://www.mining.org.tr> may help you.

3.1. Font

Manuscripts should be written in Microsoft Word Program with **Arial 10** font and single spaced. **Arial 12** font should be used in the title of manuscript. Bold texts should not be used except headings.

3.2. Page Layout

Text area on Microsoft Word page should be set to A4 paper size (21.0x29.7 cm); top margin: 3.5 cm, bottom margin: 3.2 cm, left margin: 2.,5 cm, right margin: 2.4 cm.

The front page of the manuscript should be organized as a single column. In the front page, the title of the manuscript in uppercase, author names and addresses, corresponding author’s e-mail address and the abstract with keywords should be written. The title of the manuscript should be chosen to

be short (max 2 lines) and to best reflect the subject. If all the authors are from the same institution/organization, affiliation can be written in a single line under the author names. If the authors are from different institutions/organizations, the author names should be separated by superscripts such as a, b, c and address information should be given accordingly. Corresponding author should be necessarily defined by “*” superscript.

The abstract should briefly and concisely convey the purpose, content and the results of the study, not exceeding 200 words in length. References should not be cited in the abstract. Number of the keywords can be up to 5.

The main text of the manuscript should be written as two columns, with column widths of 73 mm and space between columns of 5 mm. Two lines should be left before the main headings in the manuscript, and one line after the headings. In addition, a line space should be left between the paragraphs and the subheadings.

Paragraphs should start at the very left of the text usage area. Tables and figures should be separated from the text by a single space. The total length of the manuscript should not exceed 14 pages. All pages, including the front page, must be numbered.

3.2.1. Headings

All headings should be written in uppercase, with the characters beginning with the leftmost of the text usage area. Headings of each section should be numbered according to the numerical system, such as 1., 2., etc.

3.2.2. Sub-headings

Subheadings should be written in bold and sentence case (only first letter is capital) beginning from the leftmost of the text area. They also should be numbered according to numerical system such as 1.1., 1.2., 3.1.1., 3.1.2., etc. The tertiary subheadings should be written in italics and bold without being numbered.

3.3. Equations

If the manuscript involves any equation, then it should be placed by using Insert/Equation steps defined in Microsoft Word. Symbols used in equations should be explained together with their units. Each equation should be numbered and displayed on the rightmost edge of the writing area, and this number should be referred in the text. The equations should start from the paragraph beginning line, e.g.,

$$= 10 \times W_i \times \left(\frac{1}{P_{80}} - \frac{1}{F_{80}} \right) \dots \dots \dots (3.6)$$

3.4. Tables, Figures and Photos

Figures and photos can be inserted in color, but resolution should be set to at least 300 dpi, and tables should not be added as images. Only horizontal lines should be used on the tables. The size of the tables should not exceed the specified text area, and the units of values (such as kg, m, C°) in the table should be given. Tables, figures and photos should be referred in the text just before they placed. Table captions should be in sentence case and numbered at the top of the table. Figure and photo captions should be in sentence case, and also numbered just below of them. Punctuation marks should not be placed at the end of the captions. If a table, figure or photo is quoted as it is from any reference, the cited reference should be indicated in parentheses at the end of relevant captions. If the table, figure or photo is too large to fit in a single column, it should be preferred to center the page and give it at the beginning or end of the page.

3.5. Units and Abbreviations

International units (SI) should be used. Abbreviations should be written as uppercase characters in parentheses within their first appearance in the text and no space between the characters (e.g., Union of Chambers of Turkish Engineers and Architects (UCTEA)).

The decimal numbers should be separated by “.” while “,” should be used for the thousand digits.

3.6. References

All references cited in the manuscript should be listed under the title “REFERENCES” at the end of the text. Arial 9 font should be used. References should be written in alphabetical order by author surnames. Citation to any reference within the text should be made in author surname and year format. However, if the reference is taken from internet and/or the author is not specified, it should be in the form of Anon and year. If there is more than one unspecified reference, then they can be stated as Anon (a), Anon (b), Anon (c), ... Examples of citation to references in the text include: (Garner, 1980), (Gaudin and Fuerstenau, 1955), (Watson et al., 1997), (Madrigal, 1998), (Watson et al., 1997; Madrigal, 1998), (Anon (a), 1999).

References should be written in accordance with the APA format such as:

Gaudin, A. M., Fuerstenau, D. W., 1955. Quartz Flotation with Anionic Collectors. *Trans. AIME*, 202, 958-964.

Watson, R. T., Kelly, G. G. , Galliers, R. D., Branncheau, J. C., 1997. Key Issues in Information Systems Management: An International Perspective. *Journal of Management Information Systems*, 13 (4), 91-116.

Smith, R., 1994. *Principles of Gold Processing*. 2nd Edition, McGraw Hill, pp. 400.

4. ACCEPTANCE OF MANUSCRIPTS TO PUBLISH

Manuscripts are sent to at least two peer-reviewers by the Editorial Board to be evaluated, whom are the experts on that relevant subject. The editorial board decides whether the manuscript can be published or not published directly or through some revisions in accordance with the peer-reviewers' evaluations. The decision is reported to the author via e-mail. The author-editor-reviewer cycle in the revision process can be repeated until the revision becomes publishable as editorial content and style.

2020 YILI HAKEM LİSTESİ

List of Reviewers in 2020

Dr. Deniz ADIGÜZEL
Dr. Tevfik AĞAÇAYAK
Dr. Hakan AK
Dr. Hamdi AKÇAKOCA
Dr. Hürriyet AKDAŞ
Dr. Ece Kılınç AKSAY
Dr. Okay ALTUN
Dr. Hüseyin ANKARA
Dr. Ali İhsan AROL
Dr. M. Ümit ATALAY
Yusuf AYDIN
Dr. Mustafa AYHAN
Dr. Ahmet Deniz BAŞ
Dr. Oktay BAYAT
Dr. Mustafa BİRİNCİ
Dr. Fırat BURAT
Dr. Oktay CELEP
Dr. İlkey B. CAN
Dr. Alaaddin ÇAKIR
Dr. Serkan ÇAYIRLI
Dr. Mustafa ÇIRAK
Dr. Hasan ÇİFTÇİ
Dr. Hanifi ÇOPUR
Dr. Ömürden GENÇ
Dr. Alim GÜL
Dr. Ergin GÜLCAN
Dr. Özcan Y. GÜLSOY
Dr. Taki GÜLER
Dr. Mehmet Ali HİNDİSTAN
Dr. Çetin HOŞTEN
Dr. Türker HÜDAVERDİ
Dr. Bayram KAHRAMAN
Dr. Ali KAHRİMAN
Dr. Mehmet KARADENİZ
Dr. Abdulkadir KARADOĞAN
Dr. Cengiz KARAGÜZEL
Dr. Doğan KARAKUŞ

Dr. Celal KARPUZ
Mehmet KAYADELEN
Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN
Dr. Mustafa KUMRAL
Dr. Mete KUN
Dr. Haldun KURAMA
Dr. Türker KURTTAŞ
Dr. Ufuk MALAYOĞLU
Dr. Abdullah OBUT
Dr. Turgay ONARGAN
Dr. Ahmet Hakan ONUR
Dr. Mustafa ÖNDER
Dr. Seyhan ÖNDER
Dr. Nazlı Tınar ÖZCAN
Dr. Mehmet Kemal ÖZFIRAT
Dr. Cüneyt Atilla ÖZTÜRK
Dr. Savaş ÖZÜN
Dr. Eyüp SABAH
Dr. Ali SARIİŞİK
Dr. Hikmet SİS
Dr. Celalettin ŞİMŞEK
Dr. Nejat TAMZOK
Dr. Erhan TERCAN
Dr. Bülent TOKA
Dr. Öner Yusuf TORAMAN
Dr. Mehmet Deniz TURAN
Dr. Ali UÇAR
Dr. Uğur ULUSOY
Dr. Yaşar ÜÇBAŞ
Dr. Ayşe ÜÇYILDIZ
Dr. Suphi Ünal
Dr. Bahtiyar ÜNVER
Dr. İlgin Kurşun ÜNVER
Dr. Recep ÜZEK
Dr. Hayati YENİCE
Dr. Özgür YILMAZ
Dr. Bingchao ZHAO

