

Arif Emre Dursun
Hakan Terzioğlu

Orijinal Araştırma / Original Research

Prediction of Specific Energy Using P-Wave Velocity and Schmidt Hammer Hardness Values of Rocks Based on Laboratory Studies
Laboratuvar Çalışmalarına Bağlı Olarak Kayaçların P-Dalga Hızı ve Schmidt Çekici Sertliği Değerleri Kullanılarak Özgül Enerjinin Tahmini

Damla İzerdem
Özgür Özcan

Orijinal Araştırma / Original Research

Flowsheet Development Studies for Gold and Clay Containing Sulphide Ores
Altın ve Kil İçeren Sülfürlü Mineraller İçin Akım Şeması Geliştirme Çalışmaları

Mustafa Yavuz Çelik
Ramazan Tıǧlı

Orijinal Araştırma / Original Research

Afyonkarahisar Yöresinde Yapı Taşı Olarak Kullanılan Tüflerin Karakterizasyonu ve Tuz Kristallenmesine Dirençlerinin İncelenmesi
The Characterisation and Investigation of the Salt Crystallization Resistance of Tuffs Used as Building Stones in Afyonkarahisar Region

Gökhan Aydın
Serkan Kaya
İzzet Karakurt
Furkan Yıldırım

Orijinal Araştırma / Original Research

Aşındırıcı Sujetiyile Doğaltaş Kesmede Granit Atıklarının Aşındırıcı Olarak Değerlendirilmesi
Evaluation of Granite Wastes as Abrasive in Natural Stone Cutting With Abrasive Waterjet

Volkan Arslan

Orijinal Araştırma / Original Research

Toplam Renk Farklılığı Parametresi Kullanılarak Bulanık Mantık Yöntemiyle İstatistiksel Kalite Kontrolü: Alüminyum Üretim Tesisinde Bir Uygulama
Statistical Quality Control With Fuzzy Logic Method Using Total Color Difference Parameter: An Application in Aluminum Production Plant

İlter Kilerci
Aytaç Başsüllü
Burak Önder
Onur İpek

Orijinal Araştırma / Original Research

Trapez Kesitli Rijit Çelik Tahkimatlarda Kullanılan Çelik Profillerin Yüke Uygun Şekilde Seçiminin Sonlu Elemanlar Metodu Destekli Olarak İncelenmesi
Finite-Elements Method Aided Examination of the Selection of Steel Profiles in Accordance with the Rock Mass Used in Trapezoidal Cross-Sectioned Roadway Support



BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ
Scientific Mining Journal

Cilt / Vol: 58, Sayı / No: 3, Eylül / September, 2019

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. Nuray Demirel, Orta Doğu Teknik Üniversitesi / *Middle East Technical University*

Dr. Mehtap Gülsün Kılıç, Dicle Üniversitesi / *Dicle University*

Editör Yardımcıları / Editor Assistants

Dr. Mustafa Erkayaoğlu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi / *Middle East Technical 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 teknolojisi, 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 yayıncılığa 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: 6.9.2019 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*

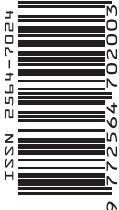
BİLİMSEL
MADENCİLİK
SCIENTIFIC MINING JOURNAL **DERGİSİ**

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

EYLÜL **CİLT** **SAYI**
SEPTEMBER *VOLUME* *NUMBER*
2019 58 3

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Arif Emre Dursun 173 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Hakan Terzioğlu **Prediction of Specific Energy Using P-Wave Velocity and Schmidt Hammer Hardness Values of Rocks Based on Laboratory Studies**
Laboratuvar Çalışmalarına Bağlı Olarak Kayaçların P-Dalga Hızı ve Schmidt Çekici Sertliği Değerleri Kullanılarak Özgül Enerjinin Tahmini
- Damla İzerdem 189 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Özgür Özcan **Flowsheet Development Studies for Gold and Clay Containing Sulphide Ores**
Altın ve Kil İçeren Sülfürlü Mineraller İçin Akım Şeması Geliştirme Çalışmaları
- Mustafa Yavuz Çelik 197 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Ramazan Tıgılı **Afyonkarahisar Yöresinde Yapı Taşı Olarak Kullanılan Tüflerin Karakterizasyonu ve Tuz Kristallenmesine Dirençlerinin İncelenmesi**
The Characterisation and Investigation of the Salt Crystallization Resistance of Tuffs Used as Building Stones in Afyonkarahisar Region
- Gökhan Aydın 211 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Serkan Kaya **Aşındırıcı Sujetiyle Doğaltaş Kesmede Granit Atıklarının Aşındırıcı Olarak Değerlendirilmesi**
İzzet Karakurt *Evaluation of Granite Wastes as Abrasive in Natural Stone Cutting With Abrasive Waterjet*
Furkan Yıldırım
- Volkan Arslan 219 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Toplam Renk Farklılığı Parametresi Kullanılarak Bulanık Mantık Yöntemiyle İstatistiksel Kalite Kontrolü: Alüminyum Üretim Tesisinde Bir Uygulama
Statistical Quality Control With Fuzzy Logic Method Using Total Color Difference Parameter: An Application in Aluminum Production Plant
- İlter Kilerci 229 Orijinal Araştırma / *Original Research*
Aytaç Başsüllü **Trapez Kesitli Rijit Çelik Tahkimatlarda Kullanılan Çelik Profillerin Yüke Uygun Şekilde Seçiminin Sonlu Elemanlar Metodu Destekli Olarak İncelenmesi**
Burak Önder *Finite-Elements Method Aided Examination of the Selection of Steel Profiles in Accordance with the Rock Mass Used in Trapezoidal Cross-Sectioned Roadway Support*
Onur İpek





Orijinal Araştırma / Original Research

PREDICTION OF SPECIFIC ENERGY USING P-WAVE VELOCITY AND SCHMIDT HAMMER HARDNESS VALUES OF ROCKS BASED ON LABORATORY STUDIES

LABORATUVAR ÇALIŞMALARINA BAĞLI OLARAK KAYAÇLARIN P-DALGA HIZI VE SCHMIDT ÇEKİCİ SERTLİĞİ DEĞERLERİ KULLANILARAK ÖZGÜL ENERJİNİN TAHMİNİ

Arif Emre Dursun^{a,*}, Hakan Terzioğlu^{b,**}

^a Konya Teknik Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, Konya, TÜRKİYE

^b Konya Teknik Üniversitesi, Elektrik Programı, Konya, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 21 Kasım / November 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 27 Haziran / June 2019

ABSTRACT

Keywords:

Specific energy,
P-wave velocity,
Schmidt hammer hardness,
Rock cutting tests,
Statistical analysis.

Specific energy has been widely used to assess the rock cuttability for mechanical rock excavation. In mechanical rock excavation processes, engineers need to predict, of machine performance based on specific energy using easy applicable, more economical and simple sample preparation methods. In this study, P-wave velocity (V_p) and Schmidt hammer hardness (R_L) tests are used as predictors for prediction of specific energy, which are thought to be a practical, simple and inexpensive test. For this purpose, rock cutting and V_p and R_L tests were performed on 24 different rock samples. The V_p and R_L values were correlated with specific energy values using simple and multiple regression analysis with SPSS 15.0. As a result of this evaluation, there is a strong relation between specific energy, V_p and R_L values of rocks. According to the statistical analyses, specific energy values can be reliably predicted by using V_p and R_L values of rocks based on laboratories studies.

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Spesifik enerji,
P dalga hızı,
Schmidt çekici sertliği,
Kaya kesme deneyleri,
İstatistiksel analiz.

Spesifik enerji değeri mekanik kayaç kazısında kayaçların kesilebilirlik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Mekanik kayaç kazısı işlemlerinde mühendisler, spesifik enerji değerine bağlı olarak makine performansını tahmin etmek için kolay uygulanabilir, daha ekonomik ve basit örnek hazırlama yöntemlerinin kullanıldığı yöntemlere ihtiyaç duyarlar. Bu çalışmada, spesifik enerjinin tahmini için pratik, basit ve ucuz bir test olduğu düşünülen kayaçların P-dalga hızı (V_p) ve Schmidt çekici sertlik (R_L) değerleri değişken olarak önerilmiştir. Bu amaçla 24 farklı kaya numunesi üzerinde kaya kesme ile V_p ve R_L testleri yapılmıştır. Elde edilen V_p ve R_L ile spesifik enerji değerleri SPSS 15.0 programı kullanılarak basit ve çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda kayaçların spesifik enerji, V_p ve R_L değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğu belirlenmiştir. İstatistiksel analizlere göre, laboratuvar çalışmalarına bağlı olarak kayaların V_p ve R_L değerleri kullanılarak spesifik enerji değerleri güvenilir bir şekilde tahmin edilebilir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: aedursun@ktun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-2001-7814>

** hterzioglu@ktun.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5928-8457>

INTRODUCTION

Specific energy is a commonly accepted measure of cutting efficiency and when obtained under a standardized condition, provides a realistic and meaningful measure of rock cuttability. Specific energy is defined as the energy required to cut a unit volume of rock, being an important indicator of rock cuttability (Rostami et al., 1994; Fowell and McFeat-Smith, 1976; McFeat-Smith and Fowell, 1977; 1979; Copur et al., 2001; Balci et al., 2004; Balci and Bilgin, 2007; Dursun, 2012; Dursun and Gokay, 2016).

Many prediction models have been developed for specific energy using some rock properties. Several rock properties such as, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, P-wave velocity, Schmidt hammer hardness, shore hardness, cone indenter hardness, static and dynamic elastic modulus, rock quality designation, point load strength, brittleness index, and density have been used for prediction of specific energy in many studies up to present (Rostami et al., 1994; Fowell and McFeat-Smith, 1976; McFeat-Smith and Fowell, 1977; 1979; Copur et al., 2001; Altindag, 2003; Balci et al., 2004; Tiryaki and Dikmen, 2006; Balci and Bilgin, 2007; Tumac et al., 2007; Copur, 2010; Copur et al., 2011; Dursun, 2012; Comakli et al., 2014; Tumac, 2014; Dursun and Gokay, 2016) In these models, V_p and R_L values of rocks have been used as predictors fewer than the other properties of rocks for prediction of specific energy.

Determination of specific energy values of rocks, prediction of excavation performance and physical and mechanical properties of rocks are very important for the studies of mine or tunnel projects. In the rock excavation technology, project engineers need to consider specific energy value and physical and mechanical properties of rocks to determine the relation between these properties of rocks and cutting machine performance. So, determination of specific energy values and physical and mechanical properties of rocks becomes a necessity for developing performance prediction models in rock excavation process.

Specific energy value is usually determined with the aid of laboratory cutting equipment which needs highly sophisticated instrumentation (Bilgin et al., 1997a; 1997b) and research engineers are always

interested in finding a method to predict specific energy from one of the simple rock properties. Since sound velocity and Schmidt hardness tests can be applied both in laboratory and in the field and these techniques are nondestructive and easy to apply, these methods are frequently used by engineers working in mining, and construction industries. Especially in mining, V_p value have increasingly been used to determine the dynamic properties of rocks in rock mechanics tests and mining applications due to easy applicable, simple sample preparation and more economical experimental studies (Brich, 1960; Thill and Bur, 1969; Inoue and Ohomi, 1981; Kopf et al., 1985; Young, et al., 1985; Gaviglio, 1989; King et al., 1995; Apuani et al., 1997; Chrzan, 1997; Boadu, 2000; Kahraman, 2001; Kahraman, 2002a; 2002b; Kahraman et al., 2005; Karakus and Tutmez, 2006; Kahraman, 2007; Cobanoglu and Celik, 2008; Kahraman and Yeken, 2008; Vasconcelos et al., 2008; Khandelwal and Singh, 2009; Yagiz, 2011; Altindag, 2012). As for R_L value is a quick and inexpensive measure of rock hardness, which may be widely used for estimation of mechanical properties of rock materials such as strength, cuttability, sawability, and drillability (Schmidt, 1951; Kidybinski, 1968; Tarkoy and Hendron, 1975; Poole and Farmer, 1978; Farmer et al., 1979; Howarth, et al., 1986; Shahriar, 1988; Bilgin et al., 1990; Kahraman, 1999; Kahraman et al., 2000; Bilgin et al., 2002; Kahraman et al., 2003; Aydin and Basu, 2005; Goktan and Gunes, 2005; Karakus and Tutmez, 2006).

Predicting specific energy is a crucial issue for the accomplishment of mechanical tunnel projects, excavating tunnels and galleries for the purpose of mining and civil projects. Many models and equations have previously been introduced to estimate specific energy based on properties of rock using various statistical analysis techniques. In the related literature, properties of rock are the most widely parameters used for prediction of specific energy. Because, mechanical excavators are excavated efficiently and economically based on properties of rocks.

Schmidt hammer rebound hardness and seismic velocity tests are very simple and inexpensive test to conduct, R_L and V_p values are good indicator of mechanical properties of rock material (Bilgin

et al., 2002). Schmidt hardness value is widely used in determining the performance of tunnel boring machines, impact hammers, roadheaders, and it is generally very successful in rock cutting applications for predicting the performance of the cutting process (Poole and Farmer, 1978; Howarth, et al., 1986; Bilgin et al., 1990; Bilgin et al., 2002; Aydın and Basu, 2005; Tuncdemir, 2008).

In the past, some prediction models for specific energy based on laboratory studies were developed for particular rock conditions which involved rock properties as predictors. However, literature surveys revealed that V_p and R_L values of rocks have been used less than the other properties of rocks for prediction of specific energy. This paper is concerned with correlation between V_p , R_L and specific energy values of rocks obtained from sophisticated laboratory equipment and developed a new specific energy prediction methods. This study is aimed to investigate using V_p and R_L values which can be applied easily and economically to determine specific energy value by using linear regression analyses.

In the first stage of this study, through the rock cutting tests performed in unrelieved cutting mode, the specific energy values have been calculated by two different methods. One of these methods is mechanical specific energy (SE_{Mec}) calculated from cutting forces and the other is electrical specific energy (SE_{Elec}) calculated from electrical parameters such as current and voltage values in the cutting tests. This study is different from the similar work done in the past because of these research activities. The second stage of this study was prediction of specific energy using V_p and R_L values of rocks based on statistical analysis.

1. LABORATORY STUDIES

The testing program in this study included rock cutting, sound velocity and Schmidt hardness tests. A total of 24 different natural stones including travertine, marble, and tuff were collected from different quarries around Konya, Turkey. The standard testing procedures suggested by the ISRM (International Society for Rock Mechanics) were applied for rock cutting, sound velocity, and hardness testing (Ulusay and Hudson, 2007).

Cylindrical core specimens were prepared from block samples for rock mechanics tests and block samples were prepared for rock cutting tests. According to thin sections, the marble samples are composed of calcite minerals. Granoblastic texture has been created with re-crystallization of calcite minerals. The travertine samples are composed of high fossil recorder and calcite crystals. The matrix of rocks has been created completely from carbonates. The tuff samples are composed of quartz, biotite and feldspar minerals, different rock fragments and pumice grains. The groundmass of rocks is composed of volcanic glass.

1.1. Sound Velocity Tests

Sound velocity tests were performed on cylindrical core specimens NX (54 mm) in diameter which were prepared from block samples by drilling in such a way that the drilling direction was perpendicular to the plane of the thin section. And then end surfaces of the core samples were cut and polished sufficiently smooth plane to provide good coupling. V_p values of rocks were determined using the MATEST test equipment and two transducers (a transmitter and a receiver) having a frequency of 55 kHz on core samples and having both surfaces parallel to each other (Figure 1).



Figure 1. Sound velocity test equipment

During the tests, both surfaces of the core samples were applied with gel as a coupling agent in this study. After the applying gel the core samples were placed between the transducers. And the transducers were pressed to either end of the

sample and the pulse transit time was recorded. V_p values were calculated by dividing the length of core to the pulse transit time as (Equation 1) The V_p values of the rocks were summarized in Table 1.

$$V_p = d/t \quad (1)$$

where V_p is the P-wave velocity in km/sec, d the length of core in cm, t the pulse transit time in sec.

1.2. Schmidt Hammer Hardness Tests

Schmidt hammer rebound tests were applied on the test samples having an approximate dimension of 30 x 30 x 20 cm³. The tests were performed with a Proceq L-type digital Schmidt hammer with impact energy of 0.735 Nm (Figure 2). The hammer is equipped with a sensor that measures the rebound value of a test impact with high resolution and repeatability. Basic settings and measured values are shown on the display unit. The measured data can be transmitted easily by a serial RS 232 cable to a normal printer or to a PC with the appropriate software. All the tests were conducted with the hammer by holding vertically downwards and at right angles to the horizontal rock surface. In the tests, the ISRM (Ulusay and Hudson, 2007) recommendations were applied for each rock type. ISRM has suggested that 20 rebound values from single impacts separated by at least a plunger diameter should be recorded, and the upper 10 values were averaged. The R_L values of the rocks were summarized in Table 1.



Figure 2. Schmidt hammer hardness test equipment

1.3. Rock Cutting Tests

Small-scale rock cutting test machine has been developed for the purpose of calculating specific energy values of rocks in the laboratory. Small-scale rock cutting test machine which is a modified Klopp shaping machine having a stroke 450 mm and a power of 4 kW was used in this study for measuring of cuttability of rocks (Figure 3). The rock cutting machine is similar to the one originally developed by Fowell and McFeat-Smith (1976), McFeat-Smith and Fowell (1977; 1979). It is suggested as a standard linear laboratory rock cutting test machine by the ISRM to measure rock cuttability. It was originally designed for core cutting in diameter of 76 mm by standard chisel tool for performance prediction of roadheaders and calculation of specific energy value in laboratory.

Rock cutting tests were carried out using standard cutting picks on blocks of rock samples with depth of cut 2 mm, cutting speed 36 cm/sec, rake angle -5°, clearance angle 5°, pick width 12.7 mm and data sampling rate 1000 Hz.

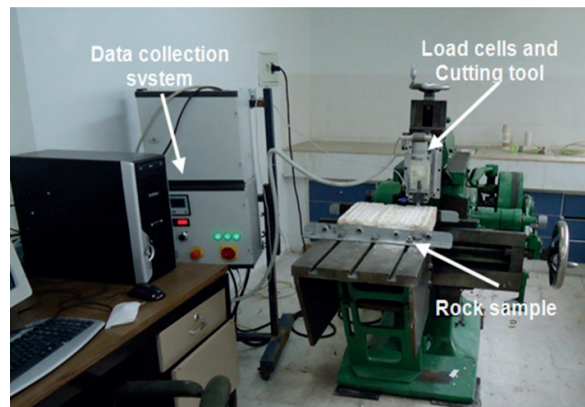


Figure 3. Small-scale rock cutting test machine

Data collection system included two load cells (cutting and normal), a current and a voltage transducer, a power analyzer, an AC power speed control system, a laser sensor, a data acquisition card and a computer. Block diagrams were prepared in Matlab Simulink for obtained the electrical and mechanical data during the cutting tests.

The data collection phase of this study included two parts: the electrical data was obtained from by using current and voltage transducer and the mechanical data (tool forces) was obtained from by using platform type load cell with capacity of 750 kg. Three tests were carried out on each rock sample in which cutting forces, electrical current, and voltage were recorded in unrelieved cutting mode. After each cutting test, the length of cut was measured and the rock cuttings by cut was collected and weighed for determination of specific energy. The electrical parameters in the cutting such as current and voltage values were recorded by current and voltage transducer which are located on the power line that transfers electric to the shaping machine. Additionally, during the time the chisel tool cut, the rock sample, the electrical data were recorded by using laser sensor which is located between current transducer with power line. And, when the chisel tool got through the cutting operation, the laser sensor finished to collect the electrical data. In this way, the data were obtained more sensitively and in a shorter time for data processing. Specific energy is defined as the amount of energy required to excavate unit volume of rock and it is one of the most important factors in determining the efficiency of a cutting system and optimum cutting geometry, and estimating net cutting rates. The specific energy values are calculated by using the (Equations 2 and 3).

$$SE_{Mec} = \left[\frac{(F_c * L)}{V} \right] * 10^{-1} \quad (2)$$

$$SE_{Elec} = \left[\frac{(P * h)}{V} \right] * 3,6 \quad (3)$$

where SE_{Mec} is the mechanical specific energy in MJ/m^3 , SE_{Elec} is the electrical specific energy in MJ/m^3 , F_c the average cutting force acting on the tool in kN, L the cutting length in cm, P the average net power in kW, ($P = \sqrt{3}IV\cos\phi$), I the average current during the cutting in A, V the average voltage in V, h the cutting time in sec, V the volume cut, in cm^3 ($V = Y/D$), Y the yield in gr, D the density in gr/cm^3 . The small-scale rock cutting test results are given in Table 1.

2. EVALUATION OF THE RESULTS

The average results of rock cutting, sound velocity, Schmidt hardness, uniaxial compressive strength (UCS), and density (ρ) values of rocks are given in Table 1. As shown in Table 1, the range varies from soft to hard rocks: UCS from 4.44 to 80.73 MPa, ρ from 1.43 to 2.77 g/cm^3 , V_p from 1.88 to 6.58 km/s, R_L from 25.95 to 80.26, and the SE_{Mec} from 5.68 to 63.45 and SE_{Elec} values range from 8.22 to 60.13 MJ/m^3 .

In this study, the rock cutting tests were performed using small-scale linear rock cutting test machine and amount of energy required to cut a unit volume of rock was calculated by using mechanical and electrical method for selected rock samples. In rock cutting tests, the tool forces and the energy consumption of cutting machine was measured and the specific energy values of the rocks was calculated in unrelieved cutting mode and 2 mm depth of cut. During the cutting tests, cutting forces were measured by load cells and electrical parameters such as current and voltage values were measured by current-voltage transducer. While measuring these values, they had been automatically saved on computer safely by using a digital data acquisition card. Relations between these two methods were evaluated using linear regression analysis with SPSS 15.0. The correlation between SE_{Mec} and SE_{Elec} values are given in Figure 4. The analysis results shown that very strong correlation was found between SE_{Mec} and SE_{Elec} and R^2 value is 0.977. It is concluded that there is a strong relation between these two methods which may be used to predict the rock cuttability. The data obtained in this study were evaluated with bivariate correlation and linear regression analyses. This methods were employed in determining the relation between specific energy values SE_{Mec} and SE_{Elec} , V_p and R_L values of rocks.

Results of the basic descriptive statistical analysis performed on input parameters are given in Table 2. First, the correlation matrix was obtained as a result of applying the bivariate correlation technique to the test data. Pearson's correlation coefficients (r -values) between specific energies (SE_{Mec} , SE_{Elec}), V_p and R_L values are given in Table 3. As shown in Table 3, very strong correlations were found between specific energies (SE_{Mec} ,

SE_{Elec}), V_p and R_L values of rocks. According to the correlation analysis, V_p and R_L are the most significant property affecting on specific energy. Correlation coefficients between specific

energies, V_p and R_L are greater than 0.90 at 99% confidence level, which shows the strong relation between these three parameters.

Table 1. Rock cutting and rock mechanics tests results

Rock Code Number	Rock Type	V_p (km/s)	R_L	UCS (MPa)	ρ (g/cm ³)	SE _{Mec} (MJ/m ³)	SE _{Elec} (MJ/m ³)
1	Travertine	4.03 ±0.17	47.78 ±4.49	18.56 ±2.57	2.16	29.75	30.06
2	Travertine	4.16 ±0.28	45.63 ±2.17	27.55 ±4.06	2.26	28.48	26.15
3	Travertine	4.70 ±0.21	53.30 ±2.15	30.69 ±5.19	2.36	36.17	32.52
4	Travertine	5.22 ±0.37	61.67 ±1.87	32.23 ±4.83	2.40	43.89	39.70
5	Travertine	4.88 ±0.28	52.71 ±3.15	25.95 ±8.60	2.33	28.68	30.13
6	Travertine	5.38 ±0.14	49.16 ±0.82	28.11 ±10.46	2.39	38.95	38.70
7	Travertine	4.57 ±0.18	48.05 ±1.02	14.82 ±3.84	2.24	32.45	26.44
8	Travertine	4.31 ±0.36	45.52 ±3.42	19.22 ±6.58	2.46	31.24	25.98
9	Travertine	4.19 ±0.19	51.29 ±1.51	22.45 ±6.02	2.48	34.81	34.85
10	Travertine	4.92 ±0.08	53.93 ±1.33	28.19 ±5.47	2.52	38.65	33.10
11	Travertine	4.12 ±0.06	53.52 ±1.93	43.95 ±8.45	2.48	32.40	34.54
12	Marble	6.58 ±0.15	70.14 ±1.23	71.98 ±11.41	2.71	63.45	59.02
13	Marble	6.54 ±0.03	65.49 ±1.80	80.73 ±25.88	2.70	62.19	55.07
14	Marble	5.98 ±0.44	69.63 ±2.19	56.16 ±12.77	2.66	62.68	60.13
15	Marble	6.26 ±0.30	61.44 ±1.33	54.63 ±8.61	2.74	42.15	40.91
16	Marble	4.22 ±0.34	70.50 ±1.95	58.87 ±12.98	2.77	47.75	41.66
17	Marble	6.39 ±0.16	80.26 ±2.86	71.18 ±9.79	2.77	60.08	58.43
18	Tuff	2.63 ±0.06	47.75 ±4.73	19.67 ±4.94	1.82	17.42	17.70
19	Tuff	1.88 ±0.08	26.66 ±0.92	4.44 ±1.18	1.43	5.68	11.08
20	Tuff	2.17 ±0.03	27.27 ±0.88	7.86 ±1.27	1.50	6.15	11.65
21	Tuff	2.28 ±0.03	33.79 ±0.87	11.86 ±0.79	1.67	11.07	11.20
22	Tuff	2.23 ±0.14	28.59 ±2.13	11.23 ±2.10	1.72	9.84	11.83
23	Tuff	2.21 ±0.05	30.21 ±2.18	8.23 ±1.72	1.66	10.24	12.34
24	Tuff	2.29 ±0.04	25.95 ±2.17	9.35 ±0.36	1.57	7.27	8.22

Table 2. Basic descriptive statistics for test data

	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	Number of samples (N)
SE _{Mec} (MJ/m ³)	5.68	63.45	32.560	18.475	24
SE _{Elec} (MJ/m ³)	8.22	60.13	31.309	16.138	24
V_p (km/s)	1.88	6.58	4.256	1.536	24
R_L	25.95	80.26	49.998	15.449	24

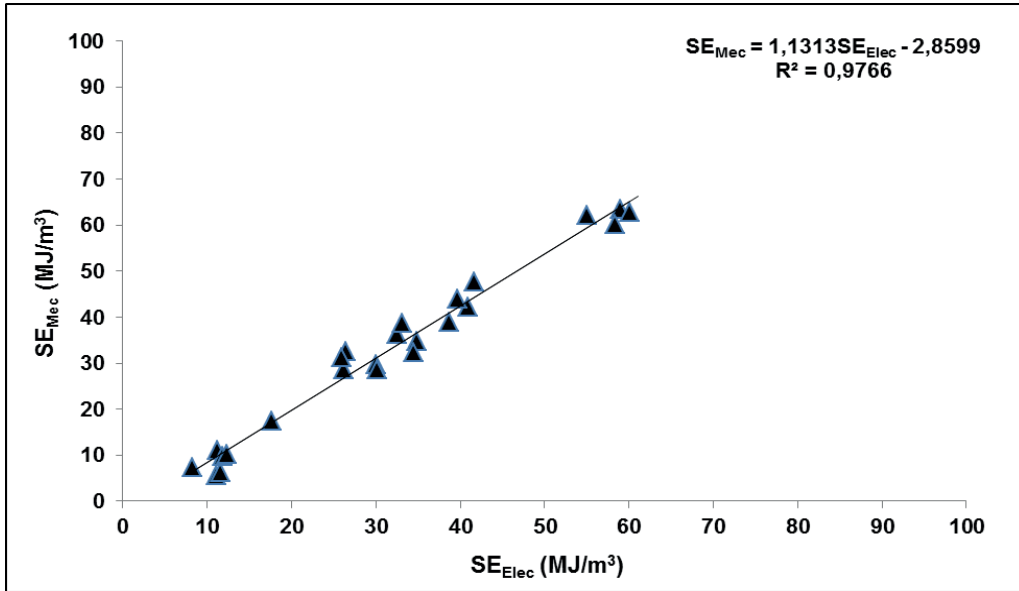


Figure 4. Relation between SE_{Mec} and SE_{Elec} obtained from unrelieved cutting mode

Table 3. Pearson's correlations between specific energies, V_p and R_L values of rocks

Independent variables		SE_{Mec}	SE_{Elec}
V_p	Pearson Correlation (r)	0.947**	0.939**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
	N	24	24
R_L	Pearson Correlation (r)	0.953**	0.947**
	Sig. (2-tailed)	0.000	0.000
	N	24	24

** Statistically significant at 0.01 level (2-tailed).

Results of the basic descriptive statistical analysis performed on input parameters are given in Table 2. First, the correlation matrix was obtained as a result of applying the bivariate correlation technique to the test data. Pearson's correlation coefficients (r -values) between specific energies (SE_{Mec} , SE_{Elec}), V_p and R_L values are given in Table 3. As shown in Table 3, very strong correlations were found between specific energies (SE_{Mec} , SE_{Elec}), V_p and R_L values of rocks. According to the correlation analysis, V_p and R_L are the most significant property affecting on specific energy. Correlation coefficients between specific energies, V_p and R_L are greater than 0.90 at 99% confidence level, which shows the strong relation between these three parameters.

2.1. Prediction of SE_{Mec} Values

In this study, both single and multi-variable regression analyses were used to investigate relation between V_p , R_L and specific energy values of rocks and finally to develop empirical equations. The SPSS 15.0 was used for the regression analyses in order to determine the relation between the dependent variable, SE_{Mec} , SE_{Elec} and the independent variables; V_p and R_L values of rocks.

The enter method feature of SPSS 15.0 was used for the multiple linear regression analysis in order to determine the relation between the dependent variables are SE_{Mec} , SE_{Elec} and the independent variables are V_p and R_L values of rocks.

In the first stage of regression analyses, specific energy values SE_{Mec} and SE_{Elec} obtained from unrelieved cutting were analyzed with simple and multiple regression analysis techniques depending on V_p and R_L values of rocks. The models developed for the SE_{Mec} estimation are given in (Equations 4-6).

$$\text{Model 1: } SE_{Mec} = 11.395V_p - 15.935 \quad (4)$$

$$\text{Model 2: } SE_{Mec} = 1.140R_L - 24.441 \quad (5)$$

$$\text{Model 3: } SE_{Mec} = 5.696V_p + 0.634R_L - 23.357 \quad (6)$$

In these models, R^2 values are 0.898, 0.909, and 0.954 respectively. In these models, which revealed the regression equation, the regression parameters are all considered as significant ($p = 0.000$), (Figure 5). According to the correlation coefficients obtained, these models predicting the SE_{Mec} value were strong and reliable. A summary of the models generated for regression analysis is given in Table 4, ANOVA results are given in Table 5 and significance of model components are given in Table 6.

Table 4. Summary of the generated models for linear regression analysis of SE_{Mec}

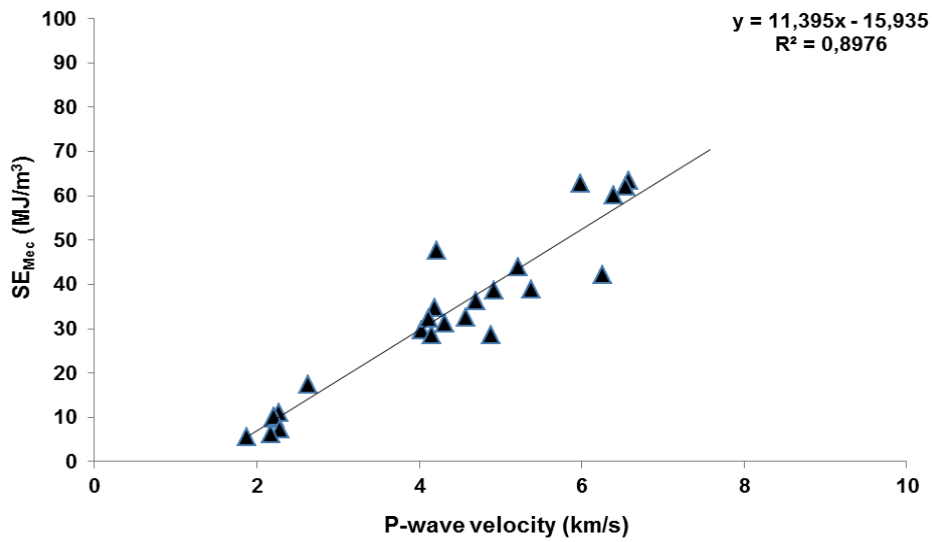
Model	Predictors	R	R ²	Adjusted R ²	Std Error of the estimate
1	V_p	0.947	0.898	0.893	6.04476
2	R_L	0.953	0.909	0.905	5.70206
3	V_p, R_L	0.977	0.954	0.949	4.15752

Table 5. ANOVA results for SE_{Mec}

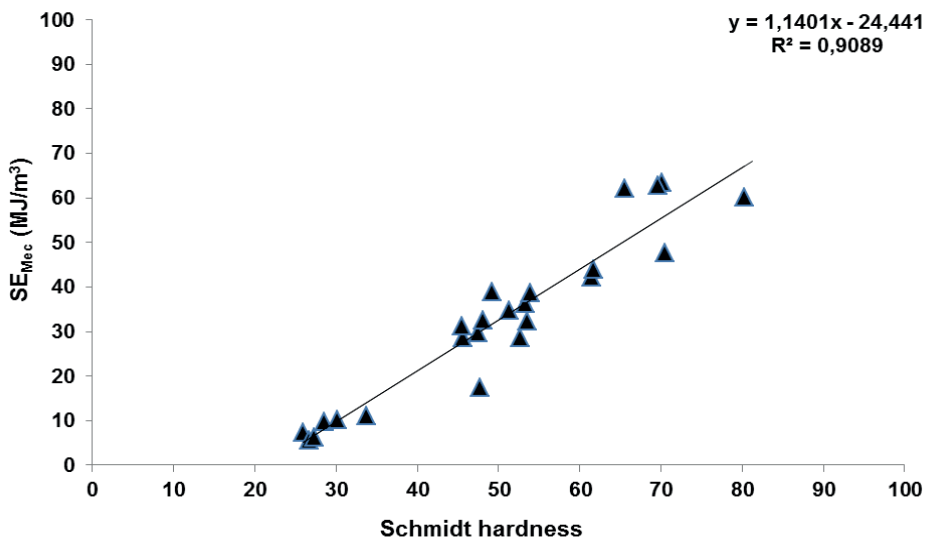
Model	Predictors	Sum of squares	df	Mean square	F	Significance of F	
1	V_p	regression	7046.325	1	7046.325	192.843	0.000
		residual	803.861	22	36.539		
		total	7850.186	23	-		
2	R_L	regression	7134.888	1	7134.888	219.444	0.000
		residual	715.297	22	32.514		
		total	7850.186	23	-		
3	V_p, R_L	regression	7487.202	2	3743.601	216.582	0.000
		residual	362.984	21	17.285		
		total	7850.186	23	-		

Table 6. Significance of model components and confidence intervals for SE_{Mec}

Regression models	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	t	Significance of t	95% Confidence interval for B		
	B	Std. error	Beta			Lower bound	Upper bound
1 (Constant)	-15.935	3.704	-	0.000	-4.302	-23.616	-8.254
V_p	11.395	0.821	0.947	0.000	13.887	9.693	13.097
2 (Constant)	-24.441	4.020	-	0.000	-6.080	-32.778	-16.104
R_L	1.140	0.077	0.953	0.000	14.814	0.980	1.300
3 (Constant)	-23.357	2.941	-	0.000	-7.942	-29.474	-17.241
V_p	5.696	1.262	0.474	0.000	4.515	3.072	8.320
R_L	0.634	0.125	0.530	0.000	5.050	0.373	0.894



(a)



(b)

Figure 5. Prediction of SE_{Mec} using P-wave velocity (a) and Schmidt hardness (b) values of rocks

2.2. Prediction of SE_{Elec} Values of Rocks

The models developed for the SE_{Elec} estimation are given in (Equations 7-9). In these models, R² values are 0.882, 0.898, and 0.904 respectively. In these models, which revealed the regression equation, the regression parameters all significant (p = 0.000), (Figure 6). According to the correlation coefficients obtained, these models predicting the SE_{Elec} value were strong and reliable. A summary of the models generated for enter regression analysis is given in Table 7, ANOVA results are given in Table 8 and signifiacne of model components are given in Table 9.

$$\text{Model 4: } SE1_{Elec} = 9.866V_p - 10.678 \quad (7)$$

$$\text{Model 5: } SE1_{Elec} = 0.990R_L - 18.171 \quad (8)$$

$$\text{Model 6: } SE1_{Elec} = 4.816V_p + 0.561R_L - 17.255 \quad (9)$$

Table 7. Summary of the generated models for linear regression analysis of SE_{Elec}

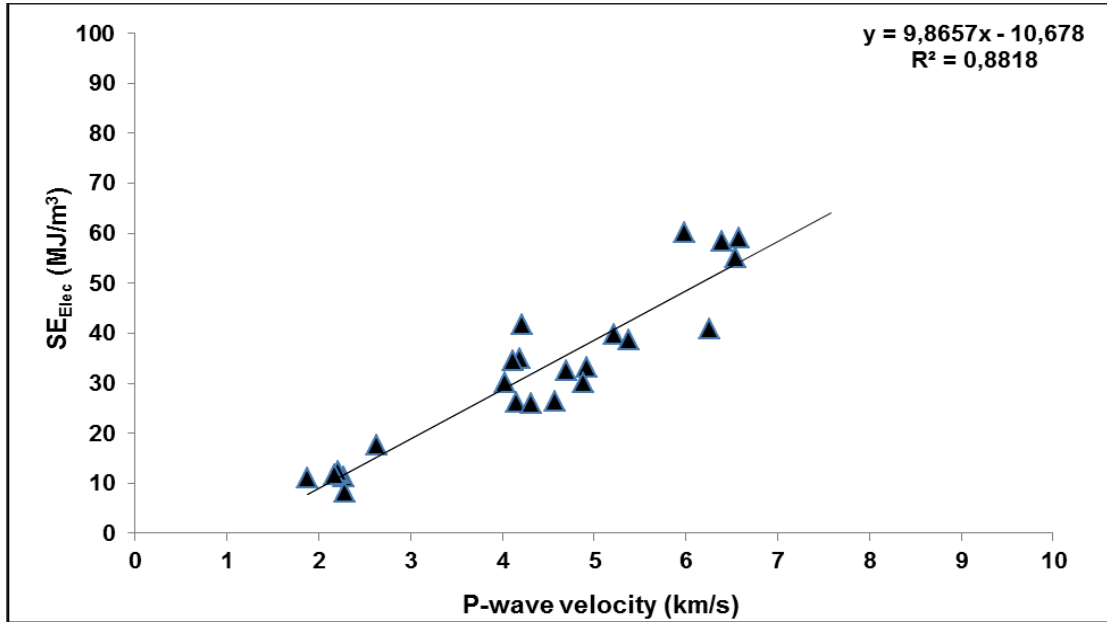
Model	Predictors	R	R ²	Adjusted R ²	Std Error of the estimate
4	V _p	0.939	0.882	0.876	5.67319
5	R _L	0.947	0.898	0.893	5.28167
6	V _p , R _L	0.969	0.940	0.934	4.15112

Table 8. ANOVA results for SE_{Elec}

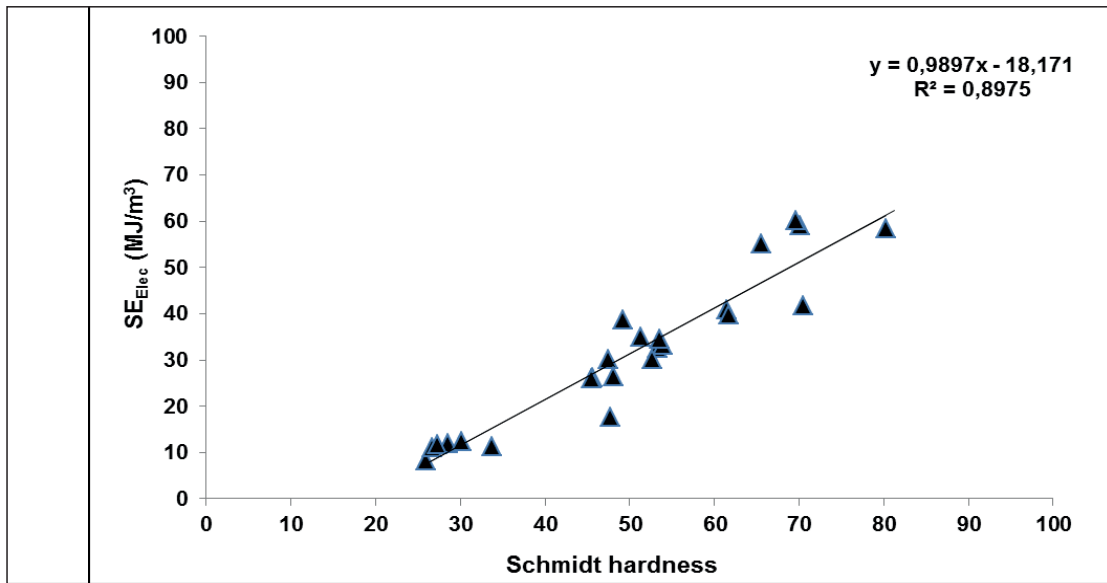
Model	Predictors	Sum of squares	df	Mean square	F	Significance of F
4	V _p	regression	5281.914	1	5281.914	164.111
		residual	708.072	22	32.185	
		total	5989.986	23	-	
5	R _L	regression	5376.274	1	5376.274	192.725
		residual	613.713	22	27.896	
		total	5989.986	23	-	
6	V _p , R _L	regression	5628.101	2	2814.051	163.298
		residual	361.885	21	17.233	
		total	5989.986	23	-	

Table 9. Significance of model components and confidence intervals for SE_{Elec}

Regression models	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	t	Significance of t	95% Confidence interval for B
	B	Std. error	Beta		Lower bound Upper bound
4 (Constant)	-10.678	3.476	-	-3.072	0.000 -17.887 3.469
V _p	9.866	0.770	0.939	12.811	0.000 8.269 11.463
5 (Constant)	-18.171	3.724	-	-4.880	0.000 -25.894 -10.449
R _L	0.990	0.071	0.947	13.883	0.000 0.842 1.137
6 (Constant)	-17.255	2.936	-	-5.876	0.000 -23.362 -11.148
V _p	4.816	1.260	0.458	3.823	0.000 2.196 7.436
R _L	0.561	0.125	0.537	4.482	0.000 0.301 0.822



a



a

Figure 6. Prediction of SE_{Elec} using P-wave velocity (a) and Schmidt hardness (b) values of rocks

2.3. Model Results and Performances

In this study, linear regression analyses were constructed to predict the SE_{Mec} and SE_{Elec} values from R_L and V_p values of rocks. In this section, some performance indices such as root mean square error (RMSE) and variance account for VAF were calculated and compared. Every specific energy values were evaluated separately with R_L and V_p values by using linear regression method. Approximately, 6 different predictive

models were carried out. To justify the accuracy of the developed equations, F-test was also applied with 99% confidence level to three of relations and they revealed statistically significant correlations.

In order to check and compare the prediction performances of linear regression based models, the variance account for VAF (Equation 10) and the root mean square error RMSE (Equation 11) performance indexes were used:

Table 10. Results of the statistical performance analysis for generated models

Model	Specific energy values (MJ/m ³)	Predictors	VAF (%)	RMSE	Correlation coefficient (r)	Standard error of estimation
1	SE _{Mec}	R _L	97.24	5.46	0.953	5.702
2	SE _{Mec}	V _p	96.91	5.79	0.947	6.044
3	SE _{Mec}	R _L , V _p	98.58	3.89	0.977	4.158
4	SE _{Elec}	R _L	97.46	5.06	0.947	5.282
5	SE _{Elec}	V _p	97.08	5.43	0.939	5.673
6	SE _{Elec}	R _L , V _p	98.49	3.88	0.969	4.151

$$VAF = \left(1 - \frac{\text{var}(o_i - t_i)}{\text{var}(o_i)} \right) * 100 \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2} \quad (11)$$

where var symbolizes the variance, o_i is the measured value, t_i is the predicted value and N is the number of samples.

The interpretation of the above performance indexes are as follows: the higher the VAF, the better the model performs. For example, a VAF of 100% means that the measured output has been predicted exactly. VAF = 0 means that the model performs as poorly as a predictor using simply the mean value of the data. The lower the RMSE, the better the model performs (Gokceoglu, 2002; Gokceoglu and Zorlu, 2004). Contrary to VAF, RMSE also accounts for a bias in the model, i.e. an offset between the measured and predicted data. Theoretically, the excellent prediction capacities are 100% for VAF, 0 for RMSE and 1 for r.

When the VAF and RMSE performance indexes are considered for each predictive model (Table 10), it's clear that the developed linear regression models employing R_L and V_p values are found to be reliable and accurate models. As utilizing the results given in Table 10, it is too difficult to select the best model within these 6 models for the specific energy prediction. These models have a lower standard error of estimate and a higher correlation coefficient (r). Therefore, it

can be said that linear regression methods are the best prediction models for the estimation of SE_{Mec} and SE_{Elec} values from R_L and V_p values for this study.

CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

In this study, rock mechanics and rock cutting tests were carried out on twenty four different rock samples. According to these test results, marble samples were found to be tougher and stronger than travertine and tuff samples. By using the rock properties such as V_p and R_L obtained from these tests, simple and multiple regressions method was used to predict the SE_{Mec} and SE_{Elec} values of the rocks.

Firstly, the correlation between SE_{Mec} and SE_{Elec} values of rocks was determined. According to this, the correlation between SE_{Mec} and SE_{Elec} was evaluated and R² value was found as 0.977.

In this study, the experimental results and the prediction model analyses show that the specific energy obtained by using small-scale rock cutting machine can be measured reliably from electrical and mechanical methods.

And then, V_p and R_L values have been used as predictors for SE_{Mec} and SE_{Elec} values based on simple and multiple regressions methods. According to simple regression method, R² values were found 0.898, 0.909 between V_p, SE_{Mec} and SE_{Elec} values respectively. In the same regression method, R² values were found 0.909, 0.898 between R_L, SE_{Mec} and SE_{Elec} values respectively.

According to multiple regression method using together V_p and R_L values, R^2 values were found 0.954 for SEMec and 0.940 for SEEec values respectively.

In the regression analysis these rock properties were also found statistically significant in estimating specific energy both individually and together, depending on the results of linear regression analysis, ANOVA and Student's t-tests, and R^2 values. R_L and V_p values were in positive correlations statistically significant with specific energies at 99% confidence level. The proposed simple and multiple regression-based models performed best when VAF changed between 96.91-98.58, RMSE changed between 3.88-5.79, correlation coefficient changed between 0.939-0.977 and standard error of estimation changed between 4.151-6.044 are considered. The statistical tests showed that both simple and multiple regression models were valid. These models can be reliably used for prediction of specific energy especially for the preliminary studies.

It was recommended that the predicting specific energy values by using these rock properties will be also easier and more practical because the two rock mechanics tests mentioned above can be performed practically both in laboratory and on field.

Rock cutting tests are expensive and time-consuming and also they require complex laboratory facilities using high quality samples in the tests. Therefore, it is important to predict the specific energy using some easy and practical rock mechanics tests without the need to use a rock cutting test equipment.

For the practitioner, each experiment means high cost and time consumption. Therefore, in practice, it is quite important to develop a model that best predicts with the fewest parameters.

REFERENCES

Altındag, R., 2003. Correlation of Specific Energy with Rock Brittleness Concepts on Rock Cutting. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall*, 103(3), 163-171.

Altındag, R., 2012. Correlation between P-Wave Velocity and Some Mechanical Properties for Sedimentary Rocks. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall*, 112, 229-237.

Apuani, T., King, M.S., Butenuth, C., De Freitas, M.H., 1997. Measurements of the Relationship Between Sonic Wave Velocities and Tensile Strength in Anisotropic Rock. In: *Developments in Petrophysics*, Geological Society Special Publication No. 122, pp. 107-119.

Aydın, A., Basu, A., 2005. The Schmidt Hammer in Rock Material Characterization. *Eng Geol*, 81:1-14.

Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H., 2004. Estimation of Specific Energy Based On Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall*, 11, 633-643.

Balci, C., Bilgin, N., 2007. Correlative Study of Linear Small and Full-Scale Rock Cutting Tests to Select Mechanized Excavation Machines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, 44, 468-76.

Bilgin, N., Seyrek, T., Shahriar, K., 1990. Roadheaders Glean Valuable Tips For Istanbul Metro. *Tunnels Tunnelling*, 29-32.

Bilgin, N., Balci, C., Eskikaya, S., Ergunalp, D., 1997a. Full Scale and Small Scale Cutting Tests For Equipment Selection In A Celestite Mine. In: Strakos, V. et al. (eds.) 6th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Balkema, Rotterdam, pp. 387-392.

Bilgin, N., Kuzu, C., Eskikaya, S., 1997b. Cutting Performance of Jack Hammers and Roadheaders In Istanbul Metro Drivages. In: Golser, J., Hinkel, W.J., Schubert, W. (eds.) In: *Proceedings World Tunnel Congress '97. Tunnels for People*, Vienna, pp. 455-460.

Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H., 2002. The Performance Prediction of Impact Hammers from Schmidt Hammer Rebound Values in Istanbul Metro Tunnel Drivages. *Tunnelling and Underground Space Technol*, 17 (3), 237-247.

Boadu, F.K., 2000. Predicting the Transport Properties of Fractured Rocks from Seismic Information: Numerical Experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 44:103-13.

Brich, F., 1960. The Velocity of Compressional Waves in Rocks to 10 kbars. Part 1. *Journal of Geophysical Research*, 65, 1083-1102.

Cobanoğlu, İ., Celik, S.B., 2008. Estimation of Uniaxial Compressive Strength from Point Load Strength, Schmidt Hardness and P-Wave Velocity. *Bull Eng Geol Environ*, 67, 491-498.

Chrzan, T., 1997. The Determination of Rocks Mechanical Properties with the Use of Ultrasounds. In: Strakos V, Kebo V, Farana L, Smutny L, editors. *Proceedings of the 6th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection*, Balkema, Rotterdam, pp. 315-318.

Comakli, R., Kahraman, S., Balci, C., 2014. Performance Prediction of Roadheaders in Metallic Ore Excavation. *Tunnelling and Underground Space Technol*, 40, 38-45.

- Copur, H., Tuncdemir, H., Bilgin, N., Dincer, T., 2001. Specific Energy as a Criterion for Use of Rapid Excavation System in Turkish Mines. *Institution Mining and Metallurgy, Transactions A, Mining Technology*, 110(A), 149-157.
- Copur, H., 2010. Linear Stone Cutting Tests With Chisel Tools For Identification of Cutting Principles and Predicting Performance of Chain Saw Machines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 47, 1, 104-120.
- Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Bilgin, N., 2011. Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48, 2, 269-282.
- Dursun, A.E., 2012. *Cuttability of Limestone Strata at North-West of Konya City*, PhD. Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Science, Selçuk University, Konya, Turkey, p.286 (In Turkish).
- Dursun, A.E., Gokay, M.K., 2016. *Cuttability Assessment of Selected Rocks Through Different Brittleness Values*. *Rock Mech Rock Eng*, 49, 1173-1190.
- Farmer, I.W., Hignett, H.J., Hudson, J.A., 1979. The Role of Geotechnical Factors in the Cutting Performance of Tunnelling Machines in Rocks. In: *Proceedings of the fourth international congress on rock mechanics of the ISRM, Montreux*, p. 371-7.
- Fowell, R.J., McFeat-Smith, I., 1976. Factors Influencing the Cutting Performance of a Selective Tunnelling Machine. in *Proc. of Tunnelling'76 Symposium*, IMM, London, March, pp.3-10.
- Gaviglio, P., 1989. Longitudinal Wave Propagation in a Limestone: The Relationship Between Velocity and Density. *Rock Mech Rock Eng*, 22:299-306.
- Gokceoglu, C., 2002. A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of Ankara Agglomerates from Their Petrographic Composition. *Eng Geol*, 66, 39-51.
- Gokceoglu, C., Zorlu, K., 2004. A Fuzzy Model to Predict the Uniaxial Compressive Strength and the Modulus of Elasticity of a Problematic Rock. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17 (1), 61-72.
- Goktan, R.M., Gunes, N., 2005. A Comparative Study of Schmidt Hammer Testing Procedures with Reference to Rock Cutting Machine Performance Prediction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, 466-477.
- Howarth, D.F., Adamson, W.R., Berndt, J.R., 1986. Correlation of Model Tunnel Boring and Drilling Machine Performances with Rock Properties. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 23, 171-5.
- Inoue, M., Ohomi, M., 1981. Relation between Uniaxial Compressive Strength and Elastic Wave Velocity of Soft Rock. In: *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock*, Tokyo, pp. 9-13.
- Kahraman, R., 1999. Rotary and Percussive Drilling Prediction Using Regression Analysis. *Int J Rock Mech Min Sci*, 36, 981-9.
- Kahraman, R., Balci, C., Yazıcı, S., Bilgin, N., 2000. Prediction of the Penetration Rate of Rotary Blast Hole Drills Using a New Drillability Index. *Int J Rock Mech Min Sci*, 37, 729-43.
- Kahraman, S., Bilgin, N., Feridunoglu, C., 2003. Dominant Rock Properties Affecting the Penetration Rate of Percussive Drills. *Int J Rock Mech Min Sci*, 40, 711-23.
- Kahraman, S., 2001. A Correlation Between P-Wave Velocity, Number of Joints and Schmidt Hammer Rebound Number. *Int J Rock Mech Min Sci*, 38, 729-733.
- Kahraman, S., 2002a. Estimating the Direct P-Wave Velocity Value of Intact Rock from Indirect Laboratory Measurements. *Int J Rock Mech Min Sci*, 39, 101-104.
- Kahraman, S., 2002b. The Effects of Fracture Roughness on P-Wave Velocity. *Eng Geol*, 63:347-350.
- Kahraman, S., 2007. The Correlations Between the Saturated and Dry P-Wave Velocity of Rocks. *Ultrasonic*, 46:341-348.
- Kahraman, S., Soylemez, M., Gunaydin, O., and Fener, M., 2005. Determination of the Some Physical Properties of Travertines from Ultrasonic Measurement. *Proceedings of 1st International Symposium on Travertine*, Denizli, Turkey, pp. 231-234.
- Kahraman, S., Yeken, T., 2008. Determination of Physical Properties of Carbonate Rocks from P-Wave Velocity. *Bull Eng Geol Environ*, 67, 277-281.
- Karakuş, M., Tutmez, B., 2006. Fuzzy And Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based On Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity. *Rock Mech Rock Eng*, 39 (1), 45-57.
- Khandelwal, M., Singh, T.N., 2009. Correlating Static Properties of Coal Measures Rocks with P-Wave Velocity. *International Journal of Coal Geology*, 79, 55-60.
- Kidybinski, A., 1968. Rebound Number and the Quality of Mine Roof Strata. *Int J Rock Mech Min Sci*, 5:283-291.
- King, M.S., Chaudhry, N.A., Shakeel, A., 1995. Experimental Ultrasonic Velocities and Permeability for Sandstones with Aligned Cracks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 32(2):155-163.
- Kopf, M., Muller, H.J., Gottesmann, B., 1985. Correlation between Pyroxene Content and V_p And V_s Under High Pressure. Kapicka, A., Kropacek, V., Pros, Z. (eds.). *Physical properties of the mineral system of the Earth's Interior*. Union Czech. Math. Phys., Prague, pp. 168-172.
- McFeat-Smith, I., Fowell, R.J., 1977. Correlation of Rock Properties and The Cutting Performance of

- Tunneling Machines. In Proc. of a Conference on Rock Engineering, CORE-UK, The University of Newcastle upon Tyne, 581-602.
- McFeat-Smith, I., Fowell, R.J., 1979. The Selection and Application of Roadheaders for Rock Tunneling. Proc. 4th Rapid Excavation and Tunnelling Conference, Atlanta, AIME, New York, 261-279.
- Poole, R.W., Farmer, I.W., 1978. Geotechnical Factors Affecting Tunnelling Machine Performance in Coal Measures Rock. Tunnels and Tunnelling, 27-30.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D., 1994. Performance Prediction, A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining. Mining Engineering, November, 1264-1267.
- Schmidt, E., 1951. A Non-Destructive Concrete Tester. Concrete, 59:34-35.
- Shahriar, K., 1988. Rock Cuttability and Geotechnical Factors Affecting the Penetration Rates of Roadheaders. PhD thesis, Istanbul Technical University, p. 241.
- Tarkoy, P.J., Hendron, A.J., 1975. Rock Hardness Index. US National Science Foundation report NSF-RAT-75-030.
- Thill, R.E., Bur, T.R., 1969. An Automated Ultrasonic Pulse Measurement System. Geophysics. 34, 101-105.
- Tuncdemir, H., 2008. Impact Hammer Applications in Istanbul Metro Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technol, 23, 264-72.
- Vasconcelos, G., Lourenco, P.B., Alves, C.A.S., Pamplona, J. 2008. Ultrasonic Evaluation of the Physical and Mechanical Properties Of Granites. Ultrasonics, 48, 453-466.
- Yagiz, S., 2011. P-Wave Velocity Test for Assessment of Geotechnical Properties of Some Rock Materials. Bull Mater Sci., 34, 947-953.
- Young, R.P., Hill, T.T., Bryan I.R., Middleton, R., 1985. Seismic Spectroscopy in Fracture Characterization. Quart. J. Eng. Geol. 18, 459-479.
- Tiryaki, B., Dikmen, A., 2006. Effects of Rock Properties on Specific Cutting Energy in Linear Cutting of Sandstones By Picks. Rock Mech Rock Eng, 39(2), 89-120.
- Tumac, D., Bilgin, N., Feridunoglu, C., Ergin, C., 2007. Estimation of Rock Cuttability from Shore Hardness and Compressive Strength Properties. Rock Mech Rock Eng, 40(5), pp. 477-490.
- Tumac, D., 2014. Predicting the Performance of Chain Saw Machines Based on Shore Scleroscope Hardness. Rock Mech Rock Eng, 47, 703-715.
- Ulusay, R., Hudson, J., 2007. The Complete ISRM Suggested Methods For Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006." Ankara: ISRM Turkish National Group.



Orijinal Araştırma / Original Research

FLOWSHEET DEVELOPMENT STUDIES FOR GOLD AND CLAY CONTAINING SULPHIDE ORES

ALTIN VE KİL İÇEREN SÜLFÜRLÜ MİNERALLER İÇİN AKIM ŞEMASI GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Damla İzerdem^{a,*}, Özgür Özcan^{a,**}

^a Hacettepe University Faculty of Engineering Department of Mining Engineering Division of Mineral Processing, Beytepe-Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 18 Ocak / January 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 29 Mart / March 2019

ABSTRACT

Keywords:

Gold,
Clay,
Flotation,
Gravity separation,
Leaching.

In this study, flowsheet development and economic approach studies have been carried out for a sulphide ore containing gold and clay. For this purpose, previous beneficiation test results were used. First, clay separation was performed from the ore. In the following step, direct leaching, gravity separation and flotation methods were tested and compared to obtain a gold pre-concentrates at different grinding sizes. According to the test results, 34% of the ore by mass was separated as clay concentrate, which was suitable for the ceramic industry. Different pre-concentrates were obtained from gravity and bulk sulphide flotation tests. The possible flowsheet alternatives were compared and discussed. Product specifications were discussed in terms of economic and environmental aspects. As a result, producing Au containing flotation concentrate without leaching was decided to be more economical. In this method, 34% of the ore could be obtained as a by-product. 77.77 g/t gold containing sulphide pre-concentrates can be obtained with a 70.05 % gold recovery.

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Altın,
Kil,
Flotasyon,
Yerçekimiyle zenginleştirme,
Liç.

Bu çalışmada, altın ve kil içeren sülfürlü bir cevher için akım şeması geliştirme ve ekonomik yaklaşım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaç için daha önce yürütülen zenginleştirme çalışmalarının sonuçları kullanılmıştır. İlk olarak cevherden kil ayırma çalışmaları yürütülmüştür. Bir sonraki adımda ise, altın içeren bir ön konsantr elde edilmesi için farklı öğütme boylarında doğrudan liç, yerçekimiyle zenginleştirme ve flotasyon yöntemleri test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarına göre, cevherin ağırlıkça %34'ü seramik endüstrisinde kullanıma uygun şekilde kil konsantresi olarak ayrılmıştır. Yerçekimiyle zenginleştirme ve flotasyon testlerinden farklı ön konsantreler elde edilmiştir. Olası akım şeması alternatifleri karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Ürün özellikleri ekonomik ve çevresel etkiler açısından tartışılmıştır. Sonuç olarak, liç uygulanmadan flotasyon ile elde edilen Au konsantrisinin daha ekonomik olabileceği kararlaştırılmıştır. Bu yöntemde cevherin %34'ü yan ürün olarak üretilebilmektedir. 77,77 g/t Au tenörlü bir ön konsantr %70,05 altın verimi ile elde edilebilmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: damlagucbilmez@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-9573-4549>

** ozgurozcan@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-6177-4585>

INTRODUCTION

The gold industry currently processes most ores via cyanide leaching and carbon adsorption. However, complex ores (i.e. ores containing sulphides, high copper & poly-metallic ores, and clay ores) may not be readily amenable to cyanidation either for economic, environmental or technical reasons. In this type of ores, it is sensible to recover optimum amount of free gold earlier in the process in order to prevent large recirculating loads of free gold or incomplete leaching. Besides, some ore types allow production of by product concentrates such as copper, zinc or even clay from the same deposit (Laplante and Gray, 2005).

The use of centrifugal and flotation operations in a closed circuit milling may be an option for reducing the circulating load and processing complex ores containing both liberated ("free") gold as well as gold in a sulphide matrix (unliberated or refractory). In such cases, modern gravity circuits can be used to recover the larger particles of free gold (+100 μm), while a flotation circuit will produce a sulphide concentrate including finer free gold particles (-100 μm) and gold containing sulphides. Nowadays, coarse-sized free gold particles are usually recovered in batch or semi continuous gravity units, such as Knelson or Falcon brand batch centrifugal concentrators (BCCs). Recent works by various authors have suggested that metallurgical performance of these units are similar, in terms of gold beneficiation (Laplante, 1993; Ancia et al., 1997). Gravity separation is often used in combination with flotation and/or cyanidation methods.

The flotation method is a technique which is widely used for the recovery of fine gold from gold-containing copper ores, base metal ores, copper nickel ores, platinum group ores and many other ores where the other processes are not applicable. Flotation is also used for the removal of interfering impurities before hydrometallurgical treatment (i.e. carbon prefloat) for upgrading the low-sulphide and refractory ores for further treatment. Flotation is considered as the most cost-effective method for concentrating fine gold (Bulatovic ve Wyslouzil, 1996). Many of the gold ores around the world contain large amount of clay minerals and it

is well known that clays have a major impact on mineral processing in various ways. They may affect froth stability as the overall flotation and the gravity separation performances (Farrokhpay, 2011; Farrokhpay and Bradshaw, 2012). In some cases, desliming of clay minerals by using multi stage hydrocycloning followed by various concentration methods are suitable for obtaining clay by-product. Attrition scrubbing of clay minerals, followed by classification with a multi-stage-hydrocycloning, is successful in removing much of the associated quartz and calcite to underflow. The hydrocyclone overflow, however, can be separated as slime, which may either be a pre concentrate or a final concentrate depending on the quality of the clay. In addition to desliming process, various physical and chemical processes like screening, magnetic separation, selective flocculation etc., can be used for clay production (Saikia et al., 2003). There have also been many studies conducted to upgrade the clays by air separation and/or by using hydrocyclone (Oats et al., 2010; Boylu et al., 2010; Dulaney and Theobald, 1974)

Gold ores can be classified as free milling, complex or refractory gold ores. Free milling ores can reach over 90% gold recovery with conventional 20-30 hours cyanide leaching processes. The ores, which are characterized due to high cyanide or oxygen consumption, are termed as complex ores whereas the ores that do not provide economic gold recovery with conventional cyanide leaching are classified as refractory ores (La Brooy et al., 1994). Arsenopyrite, pyrite and chalcopyrite are the principal primary sulphide minerals that are locking gold in refractory ores (Linge, 1992). Generally, the most economical approach for the sulphide ores has been to produce a gold-copper flotation concentrate for metal recovery by smelting. Gold pre concentrates can generally be produced by the stepwise gravity separation and flotation techniques (Gul et al., 2012).

In this paper, previous test results of different separation methods were discussed to obtain a gold containing sulphide pre concentrate and a clay by product. According to the previous test results, flowsheet development studies were performed to obtain an optimum process flowsheet of high-clay-containing sulphide ore.

1. EXPERIMENTAL RESULTS

Detailed mineralogical and characterization studies were performed. Various concentration methods were applied to the ore. Raw results were previously presented by the authors in the International Mineral Processing Symposium

2014 (Gucbilmez et al., 2014). In this part a short summary of the experimental works are summarized.

Approximately 250 kg of drill core samples were collected from an ore deposit in Akoluk-Ordu region in Turkey.

Table 1. Particle size distribution of the feed and the metal content of the fractions

Particle Size (μm)	Mass (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	S (%)	Al (%)	Cu (g/t)	Pb (g/t)	Zn (g/t)
-4650+3350	3.12	2.36	76	1.60	3.52	276	1948	5160
-3350+1180	18.38	2.43	70	1.51	3.94	430	3198	4806
-1180+600	7.38	2.95	95	1.46	4.61	890	5300	7897
-600+300	6.12	2.56	117	1.60	4.58	1294	5674	7294
-300+150	5.34	2.40	123	1.22	5.53	1272	4617	6408
-150+75	5.34	3.32	87	1.39	6.05	931	3420	5383
-75+38	5.40	3.29	64	1.32	5.94	601	2562	4712
-38	48.92	1.21	21.34	1.19	13.70	134	719	1205
Feed	100.00	1.97	54.52	1.33	9.10	448	2306	3548

The as-received samples were mixed homogeneously to prepare a representative composite feed sample, which was homogenous mixture of drill core samples. Particle size distribution of the feed was determined by wet sieving. The overall and the size-by-size chemical analyses of the feed were determined by XRF method. The particle size distribution and the size-by-size chemical analyses results are presented in Table 1. Fractional gold grade and gold recovery of the feed sample are given in Figure 1.

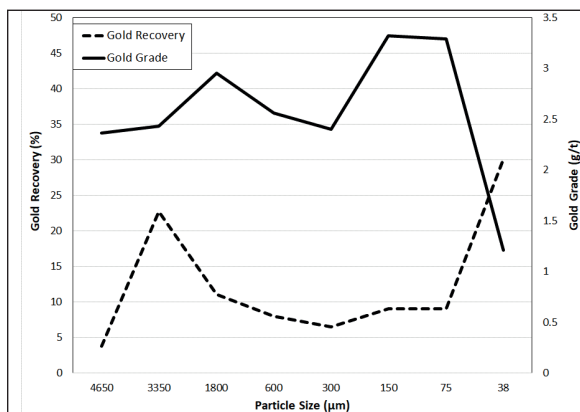


Figure 1. Gold grade and recovery of the composite feed

Figure 1 illustrates that the finest size fraction has the lowest gold grade. However, this size fraction has the highest fractional gold recovery because of fractional mass. As a result of mineralization studies, illite was defined as the main wall rock in the metallic mineralization (Yaylali-Abanuz and Tuysuz, 2010; MTA, 2011). According to Table 1, fractional Al grade (13.70%) and the recovery (73.68%) increased significantly in the -38 μm size fraction. Higher Al grade of that size fraction was thought to be a sign of clay. This estimation was supported by XRD analysis. The product of three-stage-cyclone-classification (cyclone overflow) was analyzed by XRD method to determine the mineral phases of the overflow. According to XRD pattern, the cyclone overflow consisted of 25% illite, 25% mica (mostly muscovite, little amount of biotite), 22% kaolinite, 8% chlorite, 6% quartz + feldspar and 8% amorphous material.

1.1. Clay Separation Test Results

A simplified flowsheet of clay separation process is given in Figure 2.

Table 2. Mineral phases of the final clay concentrate and a commercial grade clay (Kogel et al., 2006)

Mineral Composition	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	LOI (%)
Clay Concentrate	31.8	0.4	1.0	6.1	0.9	<0.1	51.3	0.2	6.35
Commercial Grade	24.3 min.	0.4 max.	2.0 max.	7.8 max.	2.5 max.	low	49.3 min.	0.6 max.	8.0

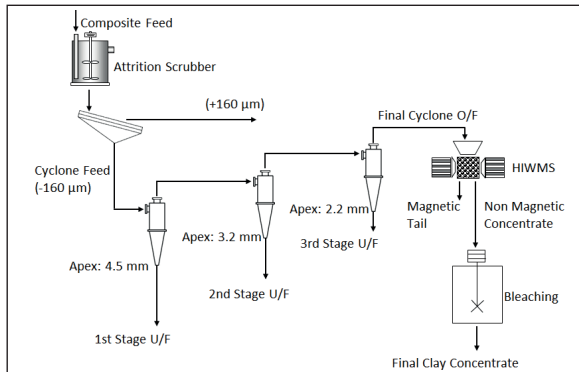


Figure 2. Simplified flowsheet of clay separation process

It can be observed from the clay removal studies that 34% of the feed material was classified as cyclone overflow. The overflow stream was concentrated up to 13.73% Al. Au, Ag and S contents of cyclone overflow were reduced to 0.53 g/t, 9 g/t and 0.60%, respectively. Au and Ag losses in cyclone overflow were 9.16% and 5.62%, respectively (Gucbilmez et al., 2014).

At the final stage of clay removal, the non-magnetic material was bleached. The mineralogical phases of the bleached material are presented in Table 2 by comparing the commercial grades of clay (Kogel et al., 2006).

1.2. Gravity Concentration Test Results

Hydrocyclone underflow and screen oversize material were mixed and ground in order to perform gravity concentration and flotation tests. That sample was called either as gravity feed or as flotation feed. Gravity concentration tests were performed by using a L40 model Falcon concentrator with the test materials having P₈₀ 90 μm and P₈₀ 38 μm, respectively. Panning was applied to the Falcon concentrates to determine the possibility of increasing the gold grade.

Gravity feed was concentrated up to 17.50 g/t Au and 521.00 g/t Ag at P₈₀ 90 μm size. Composite feed was concentrated up to 97.31 g/t Au and 1858.05 g/t Ag at P₈₀ 38 μm size by the combination of Falcon concentration and panning (Gucbilmez et al., 2014).

1.3. Flotation Test Results

According to the flotation test results, 1.88% of the feed by mass was concentrated up to 65.00 g/t Au and 2470.00 g/t Ag at P₈₀ 90 μm size. 65.43% of the feed was taken as final tail with 1.41 g/t Au and 34.14 g/t Ag grade. Total recoveries of Au and Ag in the final concentrate were 45.18% and 59.64% at P₈₀ 90 μm. 2.44% of the feed by mass was concentrated up to 77.77 g/t Au and 2479.00 g/t Ag at P₈₀ 38 μm. 44.67% of the feed was taken as final tail with 0.53 g/t Au and 21.96 g/t Ag grade. Total recoveries of Au and Ag in the final concentrate were 70.05% and 77.57% at P₈₀ 38 μm (Gucbilmez et al., 2014).

The effect of the grinding size on recovery was also apparent for each element. The recoveries of Au, Ag and S were higher at finer grinding size (P₈₀ 38 μm). It was clearly seen that Au, Ag and S grades increased in cleaner stages. There was no significant decrease in the Au and Ag recoveries at P₈₀ 38 μm grinding size. However, S recovery decreased sharply from 70% to 30% from rougher stage to cleaner stages. It can be concluded that S tended to report to tailings. This result also showed that Au and Ag were mainly presented as liberated particles instead of locked in sulphide minerals.

1.4. Gold Extraction by Cyanide Leaching

Leaching tests were performed to composite feed and flotation concentrate separately. Leach test

was performed to the composite feed to determine the leaching kinetics and cyanide consumption at 10 g/l CN concentration. Kinetic leaching test result of the composite feed is illustrated in Figure 3.

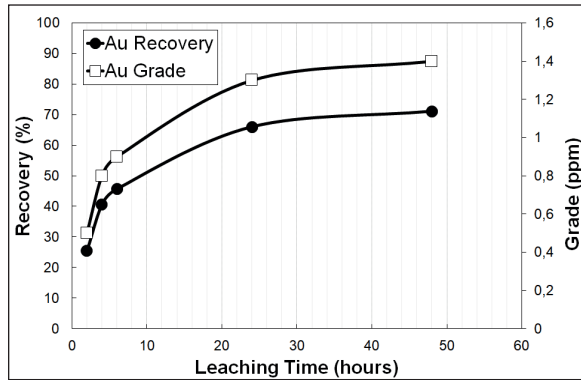


Figure 3. Kinetic leaching test result of the composite feed

The test results revealed that the leaching kinetics of the composite feed was slow, because the Au recovery increased only to 71.07% after 48 hours. Under same conditions, the leaching test was also performed to the flotation concentrate at P_{80} 38 μ m. According to the leaching results of the flotation concentrate, 23.80 g/t Au remained in the undissolved tailing. Leaching results revealed that 69.40% of the Au could be obtained as a leaching concentrate and 30.60% of the Au was reported to tailings. According to the classification of ore refractoriness, the composite feed sample could be classified as moderately refractory gold ore (50-80% recovery) (La Brooy et al., 1994). It can be interpreted that, Au which could not be beneficiated was probably in the form of enclave and because of that, it could not be in the reaction of cyanide. To determine the exact reasons for this problem, it is suggested to apply detailed mineralogical analyses and microprobe tests to the tailings of the leaching process. As a result

of the tests, kinetic test result of the composite feed was found quite compatible with the flotation concentrate.

1.5. Comparison of the Test Results

The effect of the separation methods and grinding sizes on Au grade and recovery were presented in Table 3. Au grade of gravity and flotation feed was 2.71 g/t, respectively. According to the results, Au grade and recovery of gravity concentration were quite low at coarser grinding size. Approximately 60% of the Au was lost in the final tailing in that test.

Flotation results were, however, better than gravity concentration results at coarser size. The concentrate with 65 g/t Au could be obtained. Au loss, on the other hand, could be decreased by flotation method significantly.

Increase in grinding size increased the grades and recoveries in both methods. Better liberation of sulphide minerals and Au particles at finer particle size, improves the concentration properties of Au particles and their responses to centrifugal and flotation processes. The Au grade of gravity concentrate was higher than flotation at P_{80} 38 μ m. However, Au recovery was significantly lower in gravity concentration than flotation.

Compared to other minerals, the specific gravity of Au is significantly high. A small amount of Au contained in a particle may vary the specific gravity, so these particles can report to Falcon concentrator. The particle size also affects the performance of the gravity separation. The performance can decrease at finer particle size fractions. As a result, high-grade concentrate can be obtained by using centrifugal separation in low recovery values. Furthermore, quartz particles

Table 3. Comparison of sulphide concentration methods at different grinding sizes

Grinding size	Method	Concentrate		Tail	
		Au (g/t)	Recovery (%)	Au (g/t)	Recovery (%)
P_{80} 90 μ m	Gravity	17.50	19.49	1.50	61.08
	Flotation	65.00	45.18	1.41	33.96
P_{80} 38 μ m	Gravity	97.31	36.03	1.16	38.02
	Flotation	77.77	70.05	0.53	8.74

containing little amount of gold may report to the tailings owing to the low specific gravity of quartz.

On the other hand, flotation is a physicochemical process, therefore, all sulphide minerals as well as the free gold can be collected into the froth phase as concentrate by using a specific collector. However, since all sulphide minerals would be collected, particles without gold may also be present in the concentrate phase. Therefore, in the experimental tests, comparatively higher recoveries were obtained with low grades by flotation at P_{80} 38 μm size fraction. Some losses in the flotation could be attributed to the quartz particles containing the locked gold that reports to the tailings.

2. FLOWSHEET DEVELOPMENT STUDIES

The ultimate purpose of the flowsheet development and the process planning are to devise a strategy that will optimize the project economics within the physical constraints of the deposit characteristics. Geology of the orebody, mine life, cut-off grade of the ore, location of the infrastructure/mining site and investments are some of the important technical, economic and environmental concepts, which should be considered (Pohl, 2011).

In this section, the possible flowsheet designs were discussed according to the experimental studies (Gucbilmez et al., 2014).

In the first stage of the flowsheet, clay separation was performed. After clay separation by multi-stage hydrocyclone, flotation method was preferred to obtain an Au containing pre-concentrate. A flowsheet was developed to obtain a bulk sulphide pre-concentrate and clay by-product. The flowsheet consisted of closed-circuit grinding, multi-stage hydrocyclone classification, magnetic separation and flotation. Flotation circuit consisted of a rougher and three-stage cleaner steps (Figure 4).

3. ECONOMICAL APPROACHES

Flowsheet options or different concentration methods ensure different grade and quality products. Production of a gold concentrate should be considered in terms of economic aspects. The commodity prices of the common clays and

gold are 20 \$/ton and 1290 \$/ounce, respectively (MTA, 2015; Anon, 2017).

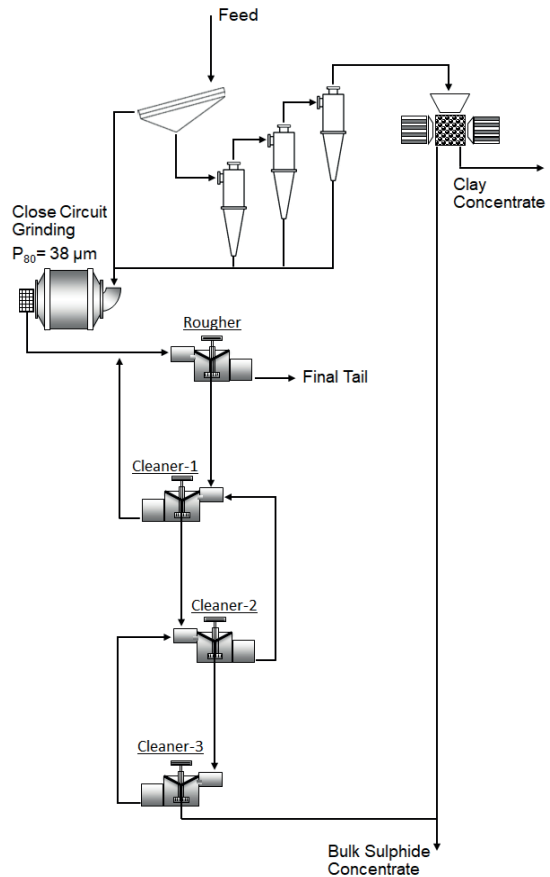


Figure 4. Recommended flowsheet of gold and clay containing sulphide ore

Approximately 70 g/t Au containing sulphide concentrate price was estimated as 800 \$/ounce (this price may change according to downstream processes).

The calculations were made by the assumption that an ore of 1.97 g/t Au is concentrated by flotation method and the clay concentrate is obtained as a by-product. Assumptions were made due to sale prices.

It was accepted that, 71.07% of the Au would be leached from the ore and 69.40% of the Au would be leached from the flotation concentrate directly.

In case of using the sample flowsheet, 34% of the ore was concentrated as a saleable clay material. 2.44% of the ore could be concentrated up to

77 g/t Au and 2400 g/t Ag with total recoveries of 70% and 77%, respectively. By using those assumptions and the prices, economical approaches were discussed in different production methods (Table 4).

According to Table 4, leaching of the ore or the flotation concentrate had the highest economic value. The amount of material for leaching the flotation concentrate was very low compared to the direct leaching of the ore. From the environmental point of view, cyanide free plant is always advantageous. A plant with flotation and leaching processes may need more investment and causes extra costs and operational difficulties for this particular circuit.

Direct leaching of the ore can be easier in terms of operation and requires less amount of capital and operational investment. However, direct leaching of the ore may cause problems due to high clay presence in the ore. Clays have a major impact on various unit operations. For instance, the ore may not be heap leachable since agglomeration reduces the effect in very heavy clay ores (Connelly, 2011). Besides that, leaching the huge amount of ore causes transportation problems as well as environmental concerns. Higher Au grade of ore does not mean that the recovery of Au will be higher in a leaching process. The presence of arsenic sulphides, organic carbon and gold locked within the sulphide matrix may cause consuming large quantities of cyanide with less Au recovery (Alp et al., 2003).

CONCLUSION

Detailed material characterization, laboratory scale tests and analyses were performed to develop an optimum flowsheet for gold and

clay containing sulphide ore. Effects of different concentration methods and particle size on gold concentration were discussed. In the first stage of the study, a salable clay concentrate was obtained successfully by using effective attrition scrubbing and three-stage hydrocycloning. A clay by-product had two benefits for a possible flowsheet. First, a salable by-product was obtained and the total amount of plant tail was decreased significantly. Second, the negative effects of clay minerals on the performance of milling and downstream processes such as flotation and gravity concentration were eliminated. 0.53 g/t Au and 9 g/t Ag losses occurred in the cyclone overflow. These grades may be economic for a regular type of gold deposit. But the high clay content of this material may not be suitable for physical separation methods and/or leaching. A detailed characterization and concentration tests should be performed to clay concentrate.

Sulphide concentration studies were performed to obtain an Au containing pre-concentrate at different grinding sizes. In addition to this, leaching tests were performed to determine the leaching kinetics and cyanide consumption. Leaching test results revealed that the ore could be classified as moderately refractory gold ore (50-80% recovery). Sulphide concentration studies revealed that an Au containing pre-concentrate could be obtained by performing centrifugal gravity separation and flotation, separately.

Decreasing the particle size from P_{80} 90 μ m to P_{80} 38 μ m increased the grade and the recovery values of Au and Ag for both methods. A high grade concentrate could be obtained by using centrifugal gravity separation in lower recoveries. Therefore, comparatively higher recoveries were obtained in lower grades by flotation at P_{80} 38 μ m size.

Table 4. Economical approaches for different production methods

METHOD	Mass to handle (tph)	Au in the mass (g)	Leach Recovery (%)	Total Au (g)	Gold return (\$)	Clay Price (\$)	Total (\$)
Direct leaching of ore	100.00	197.00	71.07	140	6371	-	6371
Bulk Sulphide Concentrate	2.44	187.88	-	188	5302	680	5982
Leaching of Concentrate	2.44	187.88	69.40	130	5933	680	6613

According to the economical and the environmental considerations, producing an Au containing pre concentrate by using flotation could be more economical. In this method, 34% of the ore could be obtained as a by-product and the total amount of the tail could be decreased significantly. In addition to that, Ag content of the concentrate could increase the price of the final concentrate.

In order to design a plant, total cost of any method should be considered. Leaching of the flotation concentrate could be an alternative for producing a final Au concentrate. Direct leaching of the ore might cause problems due to the presence of high amount clay in the ore.

REFERENCES

- Alp, I., Celep, O., Tuysuz, N., Vicil, M., Lermi, A., 2003. Mineralojik Yapının Cevher Zenginleştirme İşlemine Etkisi : Mastra ve Kaletas (Gumushane) Altın Cevherleri Üzerine Örnek Çalışma. Proceedings of the 18th International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Antalya: TMMOB, 147-154.
- Ancia, P. H., Frenay, J., Dandois, P. H., 1997. Comparison of the Knelson and Falcon Centrifugal Separators. Innovation in Physical Separation Technologies, IMM Conference, Falmouth, 53-62.
- Anon, 2017. Precious Metals Investment, Prices and Stocks. InvestmentMine, www.infomine.com/investment/precious-metals/.
- Boylu, F., Cinku, K., Esenli, F., Çelik, M. S., 2010. The Separation Efficiency of Na-bentonite by Hydrocyclone and Characterization of Hydrocyclone Products. International Journal of Mineral Processing, 94 (3-4), 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.12.004>.
- Bulatovic, S. M., Wyslouzil, D.M., 1996. Flotation Behavior of Gold during Processing of Porphyry Copper-Gold Ores and Refractory Gold-Bearing Sulphides. 2nd International Gold Symposium, Lima, 166.
- Conelly, D., 2011. High Clay Ores A Mineral Processing Nightmare. Australian Journal of Mining, 28-29.
- Dulaney, L. B., Theobald, E. F., 1974. Method of Producing Kaolin Clay from Ore Having Silica Sand Content. US Patent No: US3856213A, USA.
- Farrokhpay, S., 2011. The Significance of Froth Stability in Mineral Flotation A Review. Advances in Colloid and Interface Science, 166 (1-2), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.03.001>.
- Farrokhpay, S., Bradshaw, D., 2012. Effect of Clay Minerals on Froth Stability in Mineral Flotation: A Review. 26th International Mineral Processing Congress: Innovative Processing for Sustainable Growth, New Delhi, 4601-4611. ISBN: 81-901714-3-7.
- Gucbilmez, D., Ozcan, O., Ekmekci, Z., 2014. Beneficiation of Gold from Sulphide Ore with High Clay Content. 14th International Mineral Processing Symposium, Kusadasi, 695-702. ISBN 978-975-441-436-3.
- Gul, A., Kangal, O., Sirkeci, A. A., Onal, G., 2012. Beneficiation of the Gold Bearing Ore by Gravity and Flotation. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 19 (2), 106-110.
- Kogel, J. E., Trivedi, N. C., Barker, J. M., Krukowski, S. T., 2006. Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses.
- La Brooy, S. R., Linge, H. G., Walker, G. S., 1994. Review of Gold Extraction from Ores. Minerals Engineering, 7 (10), 1213-1241. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90114-7).
- Laplante, A. R., 1993. A Comparison of Two Centrifugal Concentrators. Annual Meeting of Canadian Mineral Processors' Conference, Ottawa.
- Laplante A. R., Gray, S., 2005. Developments in Mineral Processing. Advances in Gold Ore Processing, Amsterdam, Elsevier, 280-307. ISBN 978-044-451-730-2.
- Linge, H. G., 1992. New Technology for Refractory Gold Ores. International Conference on Extractive Metallurgy of Gold and Base Metals, Kalgoorlie, Aus.I.M.M., 339-343.
- MTA, 2011. Ordu City Mining and Energy Resources Report. General Directorate of Research and Explorations, Ankara.
- Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 2015. Ordu ili maden ve enerji kaynakları komisyon raporu, Ankara.
- Oats, W. J., Ozdemir, O., Nguyen, A. V., 2010. Effect of Mechanical and Chemical Clay Removals by Hydrocyclone and Dispersants on Coal Flotation. Minerals Engineering, 23 (5), 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.002>.
- Pohl, W., 2011. Economic Geology, Principles and Practice: Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons: Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits. ISBN 978-144-433-662-7. DOI 10.1002/9781444394870.
- Saikia, N. J., Bharali, D. J., Sengupta, P., Bordoloi, D., Goswamee, R. L., Saikia, P. C., Borthakur, P. C., 2003. Characterization, Beneficiation and Utilization of a Kaolinite Clay from Assam, India. Applied Clay Science., 24 (1-2), 93-103. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(03\)00151-0](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00151-0).
- Yaylali-Abanuz, G., Tuysuz, N., 2010. Chemical, Mineralogical, and Mass-Change Examinations Across a Gold Bearing Vein Zone in the Akoluk Area, Ordu, NE Turkey. Neues Jahrbuch Für Mineralogie Abhandlungen, 187 (1), 11-22. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2010/0157>.



Orijinal Araştırma / Original Research

AFYONKARAHİSAR YÖRESİNDE YAPI TAŞI OLARAK KULLANILAN TÜFLERİN KARAKTERİZASYONU VE TUZ KRİSTALLENMESİNE DİRENÇLERİNİN İNCELENMESİ

THE CHARACTERISATION AND INVESTIGATION OF THE SALT CRYSTALLIZATION RESISTANCE OF TUFFS USED AS BUILDING STONES IN AFYONKARAHİSAR REGION

Mustafa Yavuz Çelik^{a,*}, Ramazan Tıǧlı^{b,**}

^a Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapı Taşları Programı, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

^b Maden Mühendisi, Serbest, Antalya, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 24 Ağustos / August 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 26 Haziran / June 2019

Anahtar Sözcükler:

Yapı taşları,
Tuf,
Karakterizasyon,
Tuz kristalizasyonu,
Gözeneklilik,
Ağırlık kaybı.

Keywords:

Building stone,
Tuff,
Characterisation,
Salt crystallization,
Porosity,
Weight loss.

ÖZ

Bu çalışmada, Afyonkarahisar civarında yapı taşı olarak kullanılan Ayazini ve Seydiler tüflerine bir dizi karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Söz konusu kayaların petrografik-mineralojik (polarizan mikroskop, XRD), kimyasal analiz, gözenek çapı dağılımı ve fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. Doğal yapı taşlarının ayrışmasında su önemli bir faktördür. Suyla beraber taşınan tuz çözeltileri, kılcal çatlaklar yoluyla yapıtaşları içinde hareket ederler ve buharlaşma sonucunda çatlak ve boşluklarda tuz kristalleri oluşur. Bu oluşumlar, kayaların bozunmasına neden olmaktadır. Deneye tabi tutulan kayaların tuz kristallenmesine dirençlerini belirlemek amacıyla sodyum sülfat dekahidrat çözeltisiyle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Tüflerin tuz kristalleşmesine bağlı bozunma özellikleri ağırlık kaybı hesaplaması, tek eksenli basınç dayanımı ve ultrasonik hız ölçümleri ile belirlenmiştir. Gözenek miktarı daha fazla olan Ayazini tüflerinin ayrıştığı gözlemlenirken Seydiler tüflerinin tuz kristalleşmesine karşı daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir.

ABSTRACT

In this research, a series of characterization studies were carried out on Ayazini and Seydiler tuffs which are used as building stones around Afyonkarahisar. Petrographic-mineralogical (polarizing microscope, XRD), chemical analysis, porosity distribution and physico-mechanical properties of the mentioned rocks have been determined. Water is an important factor in the weathering of natural building stones. The salt solutions carried with the water move through the building blocks through capillary cracks and due to evaporation salt crystals form in the cracks and spaces. These formations cause the rocks to degrade. Experimental studies were conducted with sodium sulphate decahydrate solution in order to determine the resistance of the rocks to the salt crystallization. Disintegration properties of tuffs due to salt crystallization were determined by weight loss calculation, uniaxial compressive strength and ultrasonic velocity measurements. Seydiler tuffs have been determined to be more resistant to salt crystallization while Ayazini tuffs which have higher porosity amount are observed to be decomposed.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: mycelik@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-9695-7370>

** bramazant90@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-7558-7027>

GİRİŞ

Tüfler, volkanizma sırasında patlamalarla püsküren genellikle 2 mm'den daha küçük boyuta sahip olan toz ve lav parçalarının, karalarda üst üste birikerek taşlaşmasıyla oluşan kor kırıntılı kayaçlardır (Karaman ve Kibici, 2008). Tüfler, piroklastik kayaçlar içerisinde tanımlanırlar. Tüfler bileşenlerine göre sınıflandırıldıklarında üç ana bileşeni vardır: cam bileşenler (pümis, cam), kristal bileşenler ve kayaç parçası (litik) (Schmid, 1981). Tüflerin bileşiminde yer alan feldispat, kuvars, biyotit, hornblend gibi fenokristallerin yanı sıra çeşitli kayaç kırıntıları ve pomza parçaları bağlayıcı bir matriks içerisinde yer alırlar (Kadir ve Karakaş, 2000). İyi pekişmemiş tüfler, zaman içerisinde bol gözenekli yapısı nedeniyle diğer doğal taşlara göre daha çabuk ayrışmaktadır. Afyonkarahisar'ın büyük bir bölümü volkanik tüflerle kaplıdır. "Frig Vadisi" olarak bilinen bölgede, tüf kayalar içerisinde oyulmuş yerleşim yerleri, tapınak, anıt ve kaya kiliseleri Frig döneminden günümüze kadar gelmiştir (Foto 1). Ayazini ve Seydiler tüfleri, antik çağlardan beri bölgede geleneksel yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayazini ve Seydiler bölgesinde günümüzde de çok sayıda taş ocağı bulunmaktadır (Foto 2).



Foto 1. Frig vadisinde tüflere oyulmuş yerleşim yerleri ve doğal anıtlar.



Foto 2. Ayazini (a) ve Seydiler (b) yöresinde tüf ocakları.

Selçuklu ve Osmanlı Dönemi yapıları ile tarihi dokunun yaşatıldığı ve Anadolu'daki Türk kültürünü

yansıtan önemli eserlerin yer aldığı illerden birisi de Afyonkarahisar'dır. Afyonkarahisar'da günümüze kadar gelebilen cami, medrese, köprü ve han gibi genel kullanıma açık tarihi yapıların yanı sıra, çeşme, hamam, bent ve su kemeri gibi su mimarisi yapıları da önemli bir yer tutmaktadır. Bu tarihi yapıların birçoğunda Ayazini ve Seydiler tüfleri kullanılmıştır (Foto 3) (Çelik ve Sel, 2008).



Foto 3. Afyonkarahisar'da çeşitli yapılarda kullanılan tüfler.

Doğal yapı taşları, sağlam ve dayanıklı olmaları nedeniyle kullanıldığı yerde yüzlerce yıl durabilitesini korumaktadır. Ancak, yapısal ve dokusal özelliklerine bağlı olarak bazı doğal yapıtaşları, atmosfer ve çevresel etkileşimler sonucu ayrışmaya başlamaktadırlar. Tüflerin dayanımı, bileşimde yer alan minerallere, boşluk miktarına, kimyasal bileşimine ve cam içeriğine göre değişmektedir (Çelik ve Tan, 2016).

Tüfler ocaktan çıkarıldığında bir miktar doğal nem içeriğinden dolayı kolay şekillendirilmektedir. Yapıtaşı olarak kullanılacak tüfler hemen kullanılmaz, işlendikten sonra açık havada kurumaya bırakılır ve bu süreçte sağlam kalanlar kullanılır. Boşluklu yapısından dolayı tüflerin, iklim koşulları ve yıprandırıcı atmosfer etkileri karşısında gösterdiği değişiklikler, tarihi yapılarda kullanılan tüflerde de sıklıkla gözlenmektedir. Bu değişiklikler, tüflerin tanelerinin ayrışarak parçalanması ve ana kütlede ayrılmaması şeklinde gerçekleşmektedir (Çelik ve Tan, 2016).

Yapılarda kullanılan doğal taşlar, zemin veya yüzey suları ile karşılaştığında gözenek özelliklerine göre suyu bünyesine alma eğilimi gösterir. Su gerek tek başına gerekse diğer

çevresel etkenlerle beraber, yapı malzemeleri için önemli bir bozunma faktörüdür. Doğal yapı taşlarında ayrışmayı hızlandıran birçok kimyasal reaksiyonun da başlıca elemanı sudur. Doğal taşlar içinde suyun taşınması ve yer değiştirmesine yol açan mikro çatlak ve boşluklar; su emiliminin yanı sıra, kılcal su emme, organizmaların gelişimi, tuz taşınması ve kristalleşmesi gibi bozunmayı hızlandırıcı etkenleri ortaya çıkarabilir (Cueto, 2009; Vazquez vd., 2010).

Tuz kristallenmesi, potansiyel olarak kayaçlara en fazla zarar verici etkiye sahip olduğundan, bunların içinde en önemli olanıdır. Çözünabilir tuzlar, yapı ve anıtlarda parçalanmalara, yüzey dekorasyonlarının dökülmesine neden olan başlıca etkenlerdir. Doğal taşlar, bünyelerinde genel olarak suda çözünebilir tuzlar ihtiva ederler. Çözünür tuzlar, duvar malzemesinden (kum, tuğla, harç), topraktan veya havadaki gazlarının duvar yüzeyleriyle teması sonucunda ortaya çıkabilir (Öcal ve Dal, 2012).

Literatürde Ayazini ve Seydiler tüfleri ile ilgili çeşitli araştırmalara rastlanmakta olup; bu çalışmalar tüflerinin jeolojisi, çimento sanayiinde ve yapı taşı olarak kullanımı konularında yapılmıştır (Kavas ve Çelik, 2001; Kuşçu ve Yıldız, 2001; Demir vd., 2006; Çelik vd., 2014; Çelik ve Ergül, 2015).

Doğal yapı taşlarının tuz kristallenmesine dirençlerini konu alan birçok çalışma yapılmıştır. Araştırmacılar kumtaşı, tuf ve diğer gözenekli yapı taşlarının tuz kristallenmesine dirençlerini belirlemek için genellikle sodyum sülfat çözeltilerini kullanmışlardır (Sperling ve Cooke, 1985; Ruiz-Agudo vd, 2007; Angeli vd, 2008; Angeli vd, 2010; Beck ve Al-Muhtar, 2010; Shahidzadeh-Bonn vd, 2010; Vázquez vd, 2013).

Dal (2011), kireçtaşı ve mermer üzerinde doğal ortam koşullarında oluşabilecek gerçek tuz miktarını temsil etmek amacıyla %1 ve %3 oranlarında Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ etkilerine maruz bırakılarak yapı taşının bozulma miktarı, bozulma şekli ve renk değişimi incelenmiştir. Sedimanter kayaçların (kireçtaşı) ağırlık kaybının metamorfik kayaçların (mermer) ağırlık kaybından daha fazla olduğunu tespit etmiştir.

Ünal ve Gündoğdu (2011), yapı malzemesi olarak kullanılan 6 farklı tufün tuz kristalleşmesine karşı dirençlerini, kuru ağırlık kaybı ve ultrasonik hız

ölçümleri yapılarak belirlemeye çalışmışlardır. Araştırmacılar, tüflerin dayanımlarının tuz kristalleşmesinden önemli derecede etkilendiğini belirlemişlerdir. Ünal vd., (2006), farklı oluşumlara sahip doğal yapı taşlarının tuz kristalleşmesine bağlı bozunma özellikleri ultrasonik hız ölçümleri ve ağırlık kaybı hesaplaması ile belirlemeye çalışmışlardır. Deneyler sonucunda andezitin en az bozunduğunu, Limra ve Altinekin traverteninin en fazla bozunduğunu belirlemişlerdir.

Gözenekli taşlarda yapısal performans, su emme ve tuzların rolünün doğru anlaşılması, kültürel mirasın korunmasında koruma prosedürleri ve stratejilerinin tasarımında, temel bir öneme sahiptir. Bu çalışmada, yapı taşı olarak kullanılan yüksek gözenekli tüflerin fiziko-mekanik, kimyasal, mineralojik-petrografik ve gözenek özelliklerinin belirlenmesi de dahil olmak üzere seçilen taşlarda, karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, tuz kristallenmesine bağlı olarak tüflerin direncini değerlendirmek için deneyler yapılmıştır. Tüflerin tuz kristalleşmesine bağlı bozunma özellikleri ağırlık kaybı hesaplaması ve ultrasonik hız ölçümleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece, özellikle tarihi yapılarda meydana gelen tuz kristallenmesi ile yapı malzemesi ilişkisinin ortaya konulması temin edileceği gibi yörede yeni inşa edilecek yapılar için seçilecek malzemelerin tuz kristallenmesine dirençleri hususunda veri temin edilmiş olacaktır.

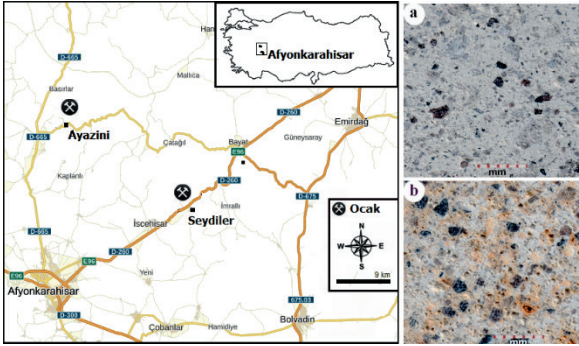
1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan tuf numuneleri, Afyonkarahisar civarındaki ocaklardan temin edilmiştir. Söz konusu ocaklar aktif olup üretilen tüfler bölgede yapıtaşı olarak kullanılmaktadır. Afyonkarahisar-Ankara karayolu üzerinde bulunan Seydiler köyü ve Afyonkarahisar-Eskişehir karayolu civarında bulunan Ayazini yöresindeki ocaklardan tuf numuneleri temin edilmiştir. Bu tüfler beyaz, gri, krem, demirli oksitleşme sonucu gelişmiş sarımsı renkler sunarlar. Söz konusu numunelerin alındığı lokasyonları gösteren yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Tuz kristallenme deneylerinde Acros marka sodyum sülfat dekahidrat kullanılmıştır. TS EN 12370 standardına göre hazırlanan çözelti

%14'lük olup, 100 g çözeltide 14 g sodyum sülfat dekahidrat, 86 g saf su kullanılmıştır.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan yapı taşı numunelerinin alındığı ocakların lokasyon haritası ve tüflerin görünümü Ayazini tufü (a), Seydiler tufü (b).

1.2. Yöntem

Malzeme karakterizasyonu için numunelere kimyasal, mineralojik-petrografik (polarizan mikroskop, XRD, SEM) test ve analizler uygulanmıştır. Kimyasal analizler, Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ), Maden Mühendisliği bölümü Doğaltaş Analiz Laboratuvarında bulunan Rigaku/ZSX Primus II marka XRF cihazında 1'er adet numune üzerinde yapılmıştır. Petrografik incelemeleri için Ankara MTA'da ince kesitler (4'er adet) hazırlanmış ve polarizan mikroskop incelemeleri, Leica DM 2500P model polarizan mikroskop ile tane büyüklüğü, dokusu ve mineralojik bileşimi açısından incelenmiştir. XRD analizleri Çanakkale Seramik Fizik laboratuvarlarında Panalytical X-pert MRD (X-celerator dedektör) ile yapılmıştır. Numunelerin tuz kristalizasyonu deneyleri sonrası SEM analiz için numuneler karbonla kaplanmış ve AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 V_p model SEM cihazı ile incelemeler yapılarak resimleri çekilmiştir.

Deneylerde kullanılan yapı taşlarının yoğunluk, su emme, gözeneklilik, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel ve mekanik test/deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, Çizelge 1'de belirtilen TS EN standartlarına göre yapılmıştır. Fiziko-mekanik deneylerde her bir tuf cinsi için 6'şar adet 70x70x70 mm, tuz kristalleşmesi deneylerinde ise 50x50x50 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır.

Çizelge 1. Fiziko mekanik testlerde kullanılan numuneler ve ilgili standartlar

Testler	İlgili standart
Yoğunluk (kg/m ³)	TS EN 1936
Ağırlıkça su emme (%)	TS EN 13755
Gözeneklilik (%)	TS EN 1936
Ultrasonik dalga hızı (km/s)	TS EN 14579
Basınç dayanımı (MPa)	TS EN 1926
Tuz kristal. direnç (%)	TS EN 12370

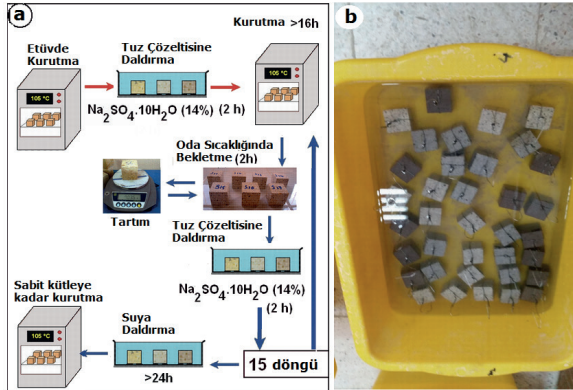
Tüflerin ultrases geçiş hızı ölçümleri TS EN 14579 standardına uygun olarak, AKÜ Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Proceq Pundit Lab marka ultrases test cihazı (P-dalgası) ile yapılmıştır (54 kHz). Deneyde kullanılan doğal yapı taşlarının su emme özelliklerine etki eden en önemli bileşenlerden birisi de gözenek çapı ve dağılımıdır. Bu amaçla, tuf numunelerinin gözenek dağılımları, AKÜ Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) cıvalı porozimetre Micromeritics Auto Pore IV 9500 cihazında belirlenmiştir. Deney şartları 480,00 erg/cm² vakum altında 140 °C kontak açısı şeklindedir.

1.2.1. Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini Deneyleri

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyleri TS EN 12370 standardına göre yapılmıştır. Bu çalışma AKÜ Maden Mühendisliği Bölümü Doğaltaş Laboratuvarı'nda %14'lük sodyum sülfat dekahidrat çözeltisi ile yapılmıştır. Tuz kristallenmesine direncin tayini deney prosedürü Şekil 2'de verilmiştir.

Deney için kenar uzunlukları 50±1 mm olan küp numuneler hazırlanmıştır. Çözeltinin yoğunluğu kullanımdan önce kontrol edilmiş ve çözelti her periyot için yeniden hazırlanmıştır. Numuneler önceden hazırlanmış bir kap içerisinde birbirleri arasında en az 10 mm ve kapla aralarında en az 20 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler, ıslatmak için (20±0,5) °C'da 2 saat çözelti içerisinde bırakılmıştır. Bekleme süresi sonrası numuneler çözeltiden alınmış ve bir etüvde kurutulmuştur. Etüv, kurutulmanın ilk anlarında yüksek bağıl nemlilik sağlayacak şekilde ve numunelerin

sıcaklığını 10 saatten az 15 saatten fazla olmayan bir süre içerisinde (105 ± 5) °C'a yükseltecek şekilde düzenlenmiştir. Numuneler en az 16 saat süreyle etüvde bırakılmış ve yeniden soğuk sodyum sülfat çözeltisine daldırılmadan önce ($2,0\pm 0,5$) saat oda sıcaklığına soğutulmuştur. İşlem numunenin dağılma parçalanma gibi durumları hariç 15 kez tekrar edilmiştir. Deney sonunda ağırlık kayıpları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 2. Tuz kristallenmesine direncin tayini deney prosedürü akım şeması (a) ve numunelerin tuz çözeltisindeki görünümü (b).

$$\Delta M = \frac{(M_f - M_{d1})}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

Burada;

ΔM : Deney öncesi ve sonrası kütlelerdeki bağlı fark (kütle kaybı veya kütle artışı); %

M_f : 15. işlemden sonra etiketle birlikte kuru deney numunesinin kütlesi; g

M_{d1} : Birinci işlemden önce etiketle birlikte kuru deney numunesinin kütlesi; g

M_d : Kuru deney numunesinin kütlesi; g

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

2.1. Kimyasal Analizler

Doğal yapı taşı olarak kullanılan ve bu çalışma kapsamında incelenen Ayazini ve Seydiler tüflerinin ana element oksit içerikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Tüflerin ana element oksit analizi sonuçlarına göre en büyük bileşen SiO₂'dir. Ayazini ve Seydiler tüflerinin SiO₂ oranı sırasıyla;

%72,30 ve 73,50 olarak belirlenmiştir. İkinci en büyük bileşen Al₂O₃ olup sırasıyla %13,60 ve 14,70'dür. Kimyasal analiz verilerine göre, tüflerin kökenini bulmak amacıyla Le Bas, vd. (1992) tarafından önerilen toplam alkali (Na₂O+K₂O) ve silis (SiO₂) diyagramı kullanılmıştır. Ayazini ve Seydiler tüflerinin Le Bas, vd. tarafından önerilen toplam alkali ve silis diyagramına göre; riyolitik bileşimli olduklarını göstermiştir (Şekil 3).

Çizelge 2. Ayazini ve Seydiler tüflerinin kimyasal analizleri

Kimyasal bileşim (%)	Ayazini Tüfü	Seydiler tüfü
SiO ₂	72,30	73,50
Al ₂ O ₃	13,60	14,70
Fe ₂ O ₃	1,43	0,52
MgO	0,12	0,11
CaO	1,02	0,85
Na ₂ O	2,29	3,78
K ₂ O	6,24	5,70
TiO ₂	0,11	0,06
A.Z.	2,84	0,78
Top.	99,95	100,00

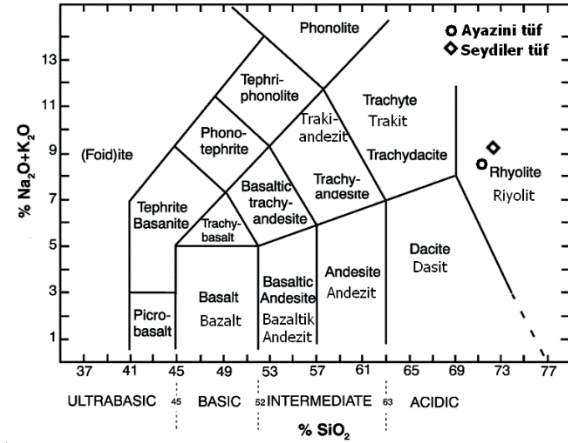
2.2. Petrografik ve Mineralojik Analizler

2.2.1. Polarizan Mikroskop Analizi

Polarizan mikroskop altındaki incelemeler petrografik açıdan; tüflerin mineralojik bileşimlerinin ve dokusal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Petrografik tanımlama için iki farklı tüf numunesinden 4'er adet ince kesit hazırlanmıştır.

Ayazini tüflerinin ince kesit incelemeleri sonunda bu tüflerin vitrofirik, porfirik ve vesiküler dokulu oldukları tespit edilmiştir. Ayazini tüf numunelerinde volkan camı (pomza) parçaları yanı sıra değişen oranlarda kuvars, feldispat mineralleri gözlenmiştir. Feldispatlar genellikle plajiyoklas kristalleri halindedir. Plajiyoklas minerallerinde Carlsbad ve polisentetik ikizlenmeler karakteristiktir. Vitrik bileşenler, cam kıymıkları ve pomza parçaları şeklinde gözlenebilmektedir (Foto 4).

Seydiler tüflerinin ince kesit incelemelerinde yer yer volkan camından oluşan matriks içerisinde düzensiz dağılmış fenokristaller gözlenmiştir. Esas mineral olarak feldispat, kuvars ve hornblend mineralleri tespit edilmiştir. Tüfler genellikle kristal vitrik tüf olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3. Deneylerde kullanılan tüflerin Le Bas, vd. (1992) diyagramında (toplam alkali içeriğine karşı silis) sınıflandırılması.

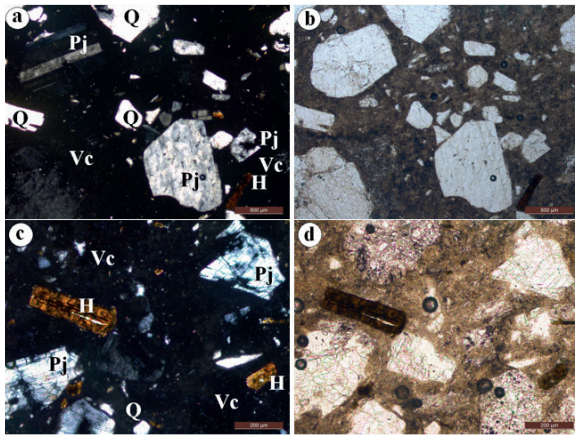
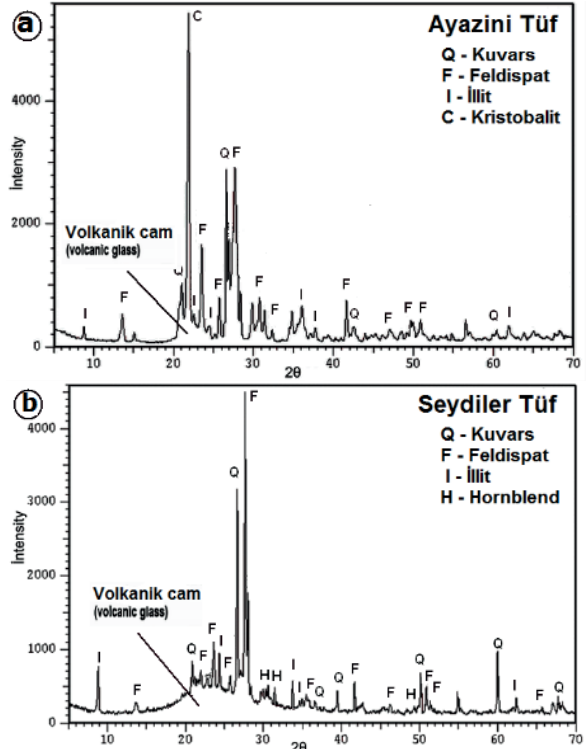


Foto 4. Ayazini ve Seydiler tüflerinin polarizan mikroskop görüntüleri, çift nikol (a, c), tek nikol (b, d). Plajiyoklas (Pj), kuvars(Q), hornblend (H), volkanik cam (pomza) (Vc).

2.2.2. XRD Analizi

İncelenen tüf örneklerinin XRD analiz sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. XRD analizi sonucunda tüflerde kuvars, feldispat, illit, hornblend ve kristobalıt mineralleri belirlenmiştir. Montmorillonit ve illit gibi kil minerallerinin varlığı volkanik cam bileşenlerin ve feldispatların yer yer bozduğu

göstermektedir. XRD grafiğinde tüflerde $2\theta=20^\circ$ ve $2\theta=15^\circ$ den itibaren zeminin yükselmesi amorf malzeme (volkanik cam) varlığını desteklemektedir.



Şekil 4. Tüflerin XRD analizi sonucu piklerin görünümü, Ayazini tüf (a), Seydiler tüf (b).

2.3. Gözenek Boyutu Dağılımı

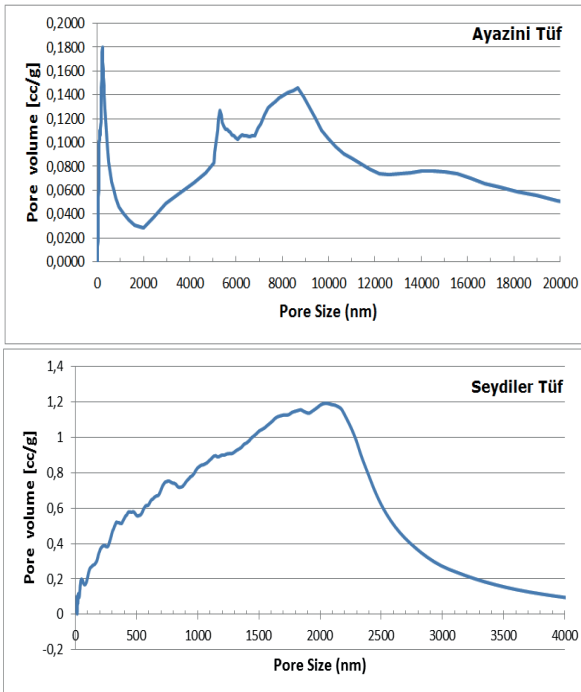
Doğal taşlarda su emme ve suyun hareketi, büyük ölçüde gözenek miktarı ve boyut dağılımına bağlıdır. Emilen su miktarı tuz kristalleşmesi, donma ve çözülme gibi olaylardan dolayı, doğal taşlarda önemli hasarlar meydana gelmesine yol açabilmektedir. Bu nedenle dış mekanlarda kullanılacak doğal taşlarda bu olayların sebep olduğu hasarları belirleyebilmek için gözenek çapı ve dağılımını bilmek gerekmektedir. Gözenek çapı dağılımının belirlenmesinde, cıvalı porozimetre yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Klopper (1985) tarafından gözenekler, boyutlarına göre şu şekilde sınıflandırılmıştır: mikro gözenek (<0,1 μm), mezo gözenek (kılcal gözeneklilik) (0,1 μm -1 mm) ve makro gözenek (>1 mm). Kapiler (kılcal) su emme, pratik olarak çapları 0,1 μm ve 1 mm arasındaki gözeneklerle ilişkilidir. Kayaçların

gözenek çapları küçüldükçe kılcallık özelliği artar. Makro gözenekler ise çapı 1 mm'den büyük olup daha çok suyun malzeme içindeki hareketini sağlarlar (Siegesmund ve Dürrast 2011).

Ayazini ve Seydiler tüflerinin gözenek boyutu dağılımını belirlemek amacıyla cıvalı porozimetre deneyi yapılmıştır. Ayazini tüflerinin gözenek boyut dağılımları Şekil 5a'da verilmiştir. Ayazini tüfleri yaklaşık 10 nm (0,010 µm) ile 20.000 nm (20 µm) arasındaki gözenek boyutlarına sahiptir. Gözeneklerin boyutu, nanometreden mikrometreye kadar geniş ölçüde değişmektedir. Cıvalı porozimetre sonuçları, gözeneklerin çoğunun (>%80) 200.000 ile 10 nm arasında olduğunu göstermektedir.

Seydiler tüflerinin gözenek çapı dağılım grafiği Şekil 5b'de verilmiştir. Seydiler tüfleri, yaklaşık 10 nm (0,010 µm) ile 4.000 nm (4 µm) arasında gözenek boyutlarına sahiptir. Gözeneklerin büyüklüğü nanometreden mikrometreye kadar geniş çapta değişmektedir. Cıvalı porozimetre sonuçları, gözeneklerin çoğunun (>%80) 3.000 ile 10 nm arasında boyuta sahip olduğunu göstermektedir. Seydiler tüfleri, Ayazini tüflerine kıyasla daha küçük gözeneklidir.



Şekil 5. Tüflerin gözenek boyutu dağılımı, Ayazini tüfleri (a), Seydiler tüfleri (b).

2.4. Fiziko Mekanik Özellikler

Tüflerin ultrases dalga hızları ile yoğunluk, tek eksenli basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri arasında pozitif yönlü ilişkiler, porozite ve kütlece su emme değerleri arasında negatif yönlü ilişkilerin varlığı bilinmektedir. Tüflerin dalga hızları değerlerinin artması ile tek eksenli basınç dayanımı, yoğunluk ağırlığı ve eğilme dayanımı değerleri lineer olma üzere doğru orantılı olarak artmakta, porozite ve kütlece su emme değerleri ise aynı şekilde azalmaktadır. Tüflerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumsuz olmasında porozite miktarı önemli bir parametredir. Nitekim tek eksenli basınç dayanımı, yoğunluk ve eğilme dayanımı değerleri ile kütlece su emme değerleri porozite miktarına göre azalmakta veya artmaktadır (Çelik, 2017).

Doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleri, kullanım yerlerinin saptanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla Ayazini ve Seydiler tüflerinin yoğunluk, su emme (ağırlıkça), gözeneklilik oranları, sismik hız değerleri, basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir. Fiziko-mekanik deneylerde elde edilen verilerin minimum, maksimum ve ortalamaları Çizelge 3'de verilmiştir. Kayaçların mekanik özelliklerinin gözeneklilik, su emme, yoğunluk gibi fiziksel özellikleri ile ilişkili olduğu bilinmektedir. Düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli doğal taşlar genellikle daha dayanıksızdır. Test edilen doğal taşların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri arasında bazı ilişkiler olduğu tespit edilmiştir.

Buna göre en düşük yoğunluk 2380 kg/m³ ile Ayazini tüflerinde ölçülmüş olup buna bağlı olarak yine en düşük ultrases dalga hızı (1,20 km/s) ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri (13,84 MPa) de bu taşta aittir. Sesin geçiş hızı taşın yoğunluğuna, gözenek özelliğine ve çatlaklı yapısına bağlı olarak değişmektedir. Taşın yoğunluğu düşük ve bünyesinde gözenekli yapı ve çatlaklar var ise sesin geçiş hızı da bunlara bağlı olarak düşük olmaktadır. Benzer şekilde en yüksek toplam gözeneklilik (%28,50) değerine sahip olan Ayazini tüfünün, en yüksek su emme değerine (%15,44) ve en düşük tek eksenli basınç dayanımı değerlerine (13,84 MPa) sahip olduğu belirlenmiştir. Kayacın gözeneklilik değerlerinin yüksek olması kayacın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilerken su emme değerinin de

Çizelge 3. Tüflerin fiziko-mekanik özellikleri (Her bir deney için 6 numune kullanılmıştır).

Test	Ayazini Tüfü			Seydiler Tüfü		
	min	max	ort	min	max	ort
Yoğunluk (kg/m ³)	2150	2510	2380	2230	2560	2400
Ağırlıkça su emme (%)	14,89	16,39	15,44	3,12	4,10	3,58
Açık gözeneklilik (%)	26,19	27,55	26,70	6,04	10,47	7,27
Toplam gözeneklilik (%)	26,16	30,49	28,50	8,29	9,63	8,80
Ultras ses dalgası hızı (km/s)	1,02	1,36	1,20	1,79	2,01	1,95
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	9,53	20,86	13,84	50,91	69,29	60,47

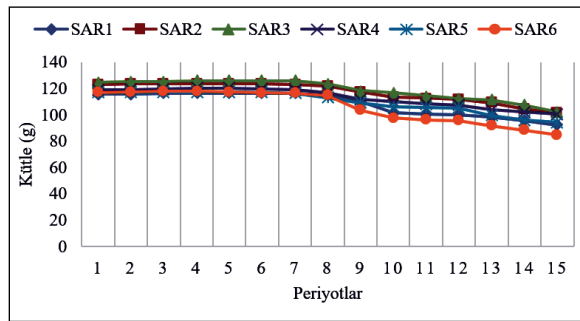
yüksek olmasına yol açmaktadır. Benzer şekilde, toplam gözenekliliği %8,80 olan Seydiler tüfünün basınç dayanımı 60,47 MPa iken ağırlıkça su emme değeri de %3,58 olarak bulunmuştur.

2.5. Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini Deneyleri

2.5.1. Ayazini Tüfü Sodyum Sülfat Dekahidrat Deneyi

TS EN 12370'e göre yapılan tuz kristallenmesine direncin tayini deneyi 5x5x5 cm küp şeklindeki Ayazini tüfü (SAR) örnekleri ile yapılmış olup on beş periyot boyunca kütle değişimi grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Ayazini tüfünün Sodyum sülfat dekahidrat çözeltisinde 1, 5, 10, ve 15. periyotlardaki görünümü Foto 5'de görülmektedir.

Sodyum sülfat dekahidrat deneyinde Ayazini tüfü numunelerinin 1, 5, 10, 15. periyotlarındaki kütle değerleri sırasıyla 119,17 g, 120,01 g, 107,36 g, 95,14 g olarak ölçülmüştür. Şekil 6 incelendiğinde, Ayazini tüfünün gözeneklilik değeri yüksek olduğu için ilk yedi periyotta tuz kristalleri gözeneklerde birikmiş bu sebepten dolayı ağırlıkta artış gözlenmiştir. 8. periyottan sonra kütle kayıpları oluşmaya başlamıştır. Bu durum tuz kristallenmesi nedeniyle Ayazini tüfünün ayrışmaya başladığı şeklinde ile izah edilebilir. İlk olarak yüzeyden dökülmeler şeklinde gelişen ayrışmalar daha sonra artarak devam etmiştir. İlk ağırlığı ortalaması 119,17 g olan Ayazini tüfü, 15. periyotun sonunda %25,26 ağırlık kaybına uğramıştır. 15. periyotun sonunda Ayazini tüflerinin düzgün geometrik şekilleri bozulmuş ve kenar-köşe detayları kaybolmuştur.



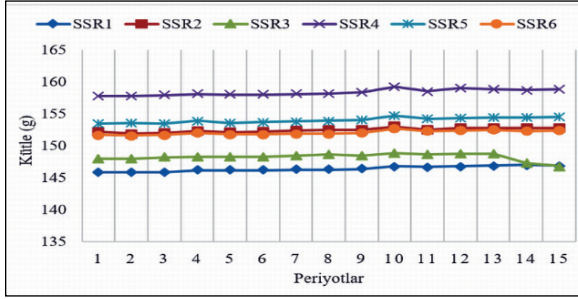
Şekil 6. Ayazini tüfü numunelerinin tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde kütle değişim grafiği.



Foto 5. Sodyum sülfat dekahidrat çözeltisinde 1, 5, 10, ve 15. periyotlardaki Ayazini tüfü numunelerinin görünümü.

2.5.2. Seydiler Tüfü, Sodyum Sülfat Dekahidrat Deneyi

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyi 5x5x5 cm küp şeklindeki Seydiler tüfü (SSR) örnekleri ile yapılmış olup on beş periyot boyunca kütle değişimi grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Seydiler tüfü örneklerinin tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde kütle değişim grafiği.

Seydiler tüfünün Sodyum sülfat dekahidrat çözeltisinde 1, 5, 10, ve 15. periyotlardaki görünümü Foto 6'da görülmektedir. Sodyum sülfat dekahidrat deneyinde Seydiler tüfü numunelerinin 1, 5, 10, 15 periyotlarındaki ortalama kütle değerleri sırasıyla 151,51 g, 151,64 g, 152,53 g ve 152,06 g'dır. Seydiler tüfünün gözeneklilik değeri %7,27 iken Ayazini tüfünün %26,70'dir. Bu özelliğinden dolayı Seydiler tüfünde ağırlık kaybı, 15 periyot boyunca yaşanmamış olup üstelik %0,36 ağırlık artışı kaydedilmiştir. Bu durum tüfün boşluk ve yüzeylerinde biriken tuz kristalleri ile açıklanabilir. Tüfün gözenek ve yüzeylerinde biriken sodyum sülfat tuzunun varlığı SEM analizi ile doğrulanmıştır. Gözenek çapı dağılımı da bunu desteklemektedir. Seydiler tüflerinin %80'i 3.000 ile 10 nm arasında iken Ayazini tüflerinin %80'i 200.000 ile 10 nm arasında gözenek çapı dağılımı göstermektedir. Seydiler tüflerinin gözenekleri daha küçük bir çap dağılıma sahiptir. Bu durumda Seydiler tüfü daha fazla tuz kristallenmesi döngüsüne maruz kalmadığı sürece 15 döngüde tuz kristallenmesine dayanıklı olduğu söylenebilir.

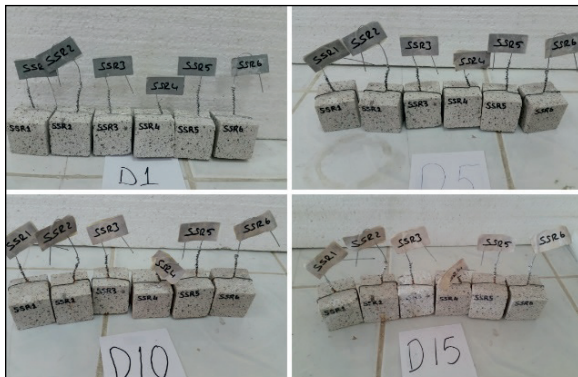
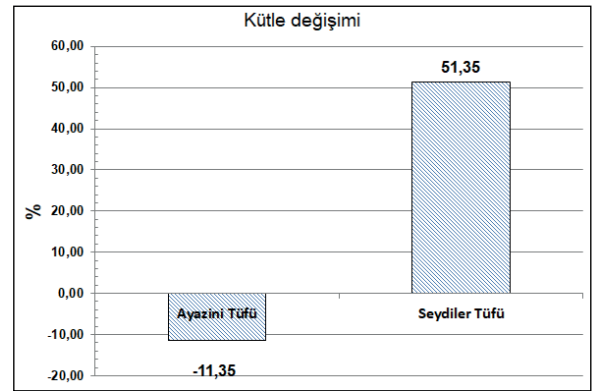


Foto 6. Sodyum sülfat dekahidrat çözeltisinde 1, 5, 10, ve 15. periyotlardaki Seydiler tüfünün görünümü.

2.6. Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini Sonrası Tüflerde Meydana Gelen Değişikliklerin İncelenmesi

Tuz kristallenmesine direncin tayini sonrası tüflerde meydana gelen değişiklikler, kütle değişimi, ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı verileriyle incelenmiştir (Çizelge 4).

15 periyot sonunda Ayazini tüflerinin (SAR) aşınma oranının yüksekliği nedeniyle kübik yapıda şekil değişikliği oluşmuş geometrik düzgün yapı bozulmuştur. Bu nedenle ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri ölçülemedi. Ayazini tüflerinde kütle kaybı değeri %11,35 oranında azalma olarak ölçülmüştür (Şekil 8).



Şekil 8. Ayazini ve Seydiler tüflerinde kütle değişimi.

Seydiler tüflerinde ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı verilerinin yükseldiği belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı değeri %51, tek eksenli basınç dayanımı değeri de %23 artış göstermiştir. Tuz kristallenmesi deneyinde, gözenekli yapıdan dolayı, boşlukların tuz kristalleri ile dolması ve ayrışmanın da henüz başlamamış olması, hem ultra ses geçiş hızı hem de tek eksenli basınç dayanımı değerlerinin yükselmesine yol açmıştır. Aynı şekilde kütle artışı da %51,35 oranında gerçekleşmiştir.

Çizelge 4. Tuz kristallenmesine direncin tayini sonrası tüflerde meydana gelen değişiklikler

	Ayazini	Tüfü	Seydiler	Tüfü
	Orijinal numune	Sodyum Sülfat deneyi sonrası	Orijinal numune	Sodyum Sülfat deneyi sonrası
Kütle değişimi (%)	-	-11,35	-	51,35
Ultra ses geçiş hızı (km/s)	1,2	Ölçülemedi	1,95	2,95
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	13,84	Ölçülemedi	60,47	74,12

2.7. Tuz Kristallenmesi Etkisinin SEM ile İncelenmesi

Tuz kristallenmesi testinin ana hedefi, yapı taşlarının uzun süreli dayanımını öngörmek, her taş türünün bozunma ve bozunma özelliklerini incelemek ve tuzun ayrışma üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Deneyde kullanılan sodyum sülfat dekahidrat ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sıcaklık ve nem koşullarına bağlı olarak hem mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) hem de tenardit (Na_2SO_4) olarak kristallenebilir (Flatt, 2002; Benavente vd, 1999). Sodyum sülfat, yüksek nemli ortamlarda mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), düşük nemde tenardit (Na_2SO_4) oluşturmak üzere kristalleşir (Flatt, 2002). Mirabilitin dehidratasyonu ile de tenardit (Na_2SO_4) oluşmaktadır. Sodyum sülfat, susuz fazdan (tenardit) dekahidrat formuna (mirabilit) geçişi sırasında genişleme (mol hacminde 4,15 kat artış) özelliğine sahip olduğu için en zararlı tuzlardan biridir (Doehne, 1994). Uygun koşullarda oluşursa anhidrat sodyum sülfat (Na_2SO_4 -tenardit) sulu çözeltisinde 10 mol su alarak mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kristaline dönüşür. Kristalizasyon, bir katı maddenin boşluklarında meydana gelirse

genleşme nedeniyle boşluk çeperlerinde yaratacağı basınç hasar oluşturabilir. Sodyum sülfat için en uygun tenardit-mirabilit dönüşüm ortamı 30-33 °C %85 bağıl nem ortamıdır (Stark, 2002). SEM analizinde mirabilit kristalleri kısa prizmatik, agregatlar şeklinde, tenardit ise uzun yassı levhamsı şekilli kristaller halinde gözlemlenir.

Doğal yapı taşlarında nemin kaynağı genellikle kılcal etki ile yükselen zemin suyu veya temelde bulunan sabit bir su kaynağıdır. Bu su kaynağının çeşitli tuz bileşikleri içermesi halinde doğal taşlarda ayrıştırma etkisi daha fazla olacaktır. Bu ayrışmanın etkisini görebilmek amacıyla tuzlu suda tuf örneklerine tuz kristalleşmesi deneyi yapılmıştır. Tuz kristalleşmesi deneyi 15 periyot sonunda doğal taş yüzeylerinde ve gözeneklerinde oluşan birikinti tuz (sülfat bileşikleri) varlığı Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile araştırılmıştır. Tuf örneklerinde, sülfat kristallenmesini belirlemek üzere sülfat olduğu belirlenen tanelerde EDX analizi yapılmıştır. Ayazini tufünde belirlenen sülfat kristalleri ve elde edilen EDX grafiği Foto 7’de, Seydiler tufünün EDX grafiği Foto 8’de verilmiştir.

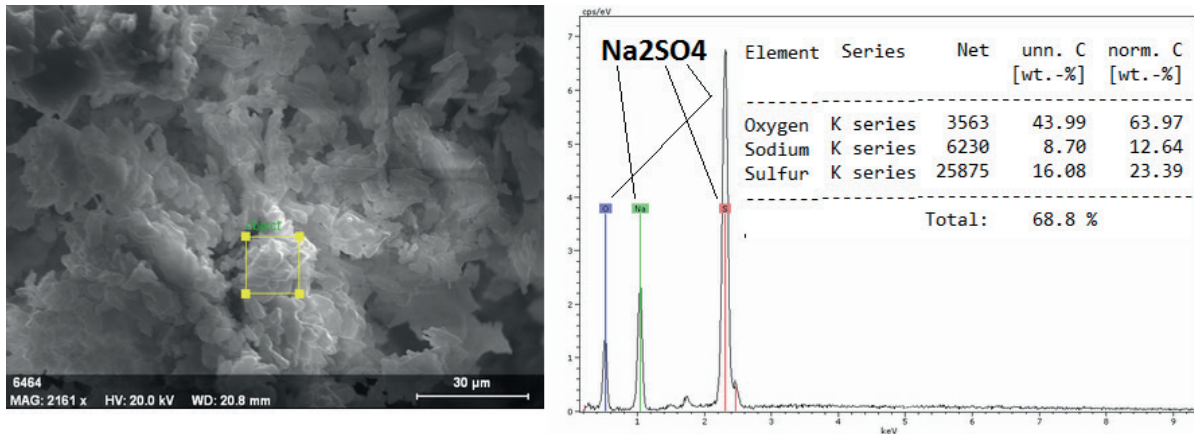


Foto 7. Ayazini tüflerinde gözlenen sülfat kristalleri (tenardit) ve elde edilen EDX grafiği

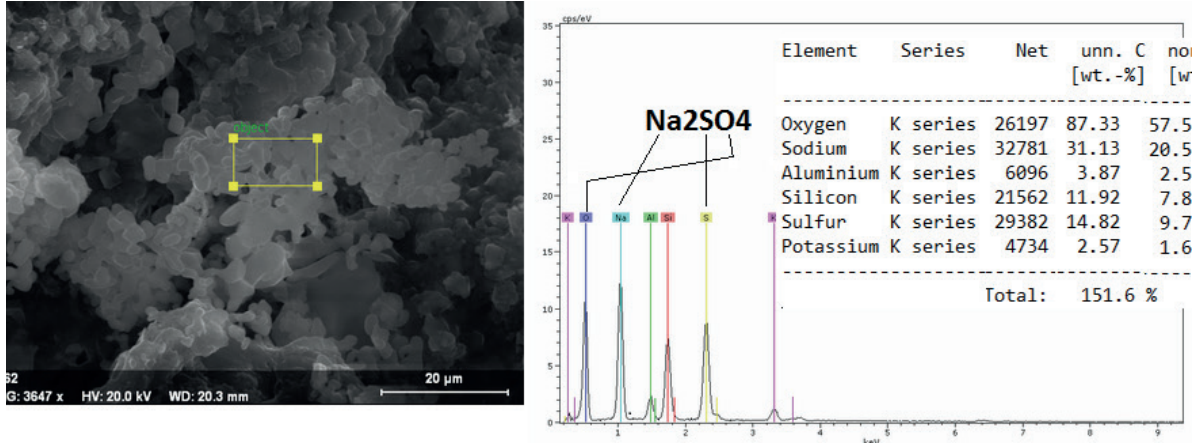


Foto 8. Seydiler tüflerinde belirlenen sülfat kristalleri (tenardit) ve elde edilen EDX grafiği

SONUÇLAR

Tuzlu su, zeminden veya yüzeyden yapı taşları ile temas halinde olduğu zaman kılcal yollarla içeri girerek malzeme içerisinde yükselir. Suyun ve içerisinde çözünmüş halde bulunan tuzun zamana bağlı tahribatı malzemenin mukavemetini etkiler. Bu nedenden dolayı yapıtaşlarının gözenek oranı ve boyut dağılımı ve bunlara bağlı su emme miktarı önemlidir. Bu çalışmada, Afyonkarahisar bölgesinde yapıtaşı olarak kullanılan Ayazini ve Seydiler tüflerinin kimyasal, mineralojik ve petrografik, fiziko-mekanik ve gözeneklilik özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin yanında tuz kristallenmesine dayanım potansiyelleri değerlendirilmiştir. Yapılan analiz ve deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Polarizan mikroskop incelemelerinde; volkan camı (pomza) parçaları yanı sıra değişen oranlarda kuvars, feldispat mineralleri gözlenmiştir. Tüfler genellikle kristal vitrik tüf olarak tanımlanmıştır.

Tüflerin gözenek çapı dağılımı cıvalı porozimetre ile tespit edilmiş olup, Ayazini tüfleri 10 nm (0,010 µm)-20.000 nm (20 µm) arasında, Seydiler tüfleri 10 nm (0,010 µm) ile 4.000 nm (4 µm) arasında gözenek dağılımı gösterdiği belirlenmiştir.

Doğal yapı taşlarının kullanım alanlarının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametreler fiziksel ve mekanik özelliklerdir. Bu çalışma kapsamında incelenen Ayazini ve Seydiler tüflerinin fiziksel ve mekanik özellikler arasında bazı ilişkiler olduğu belirlenmiştir. Buna göre en düşük görünür yoğunluk 2380 kg/m³ ile Ayazini

tüflerinde ölçülmüş olup buna bağlı olarak yine en düşük ultrases dalga hızı (1,20 km/s) ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri (13,84 MPa) de bu taş aittir. Ayazini tüfü %15,44 değeri ile en yüksek su emme değerine sahiptir. Bu durum en yüksek toplam gözeneklilik (%28,50) değerine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek gözeneklilikten dolayı Ayazini tüfü, 13,84 MPa en düşük tek eksenli basınç dayanımı göstermektedir.

Fiziko-mekanik özelliklerin etkisi tuz kristallenmesi deneyinde de teyit edilmiştir. Seydiler tüfüne göre daha zayıf özelliklere sahip olan Ayazini tüfü çok daha fazla ayrışmaya maruz kalmıştır.

Ayazini tüflerinin tuz kristallenmesi deneyi sonrasında geometrik yapı bütünlüğü bozulmuştur. Bu durum tuz kristallenmesi nedeniyle oluşan ayrışma nedeniyle gerçekleşmiştir. Geometrik yapının bozulması nedeniyle ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri ölçülemez. Seydiler tüflerinde ise ultrases geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri yükselmiş olup artış miktarı sırasıyla %51 ve %23 olarak gerçekleşmiştir. Bu artışın nedeni Seydiler tüflerinin daha küçük çaplı gözeneklere sahip olması ve bu gözeneklerde tuz birikimlerinin olması şeklinde açıklanabilir. Söz konusu tuz kristallerinin varlığı her iki tüf cinsinde de SEM ve EDX yöntemleriyle belirlenmiştir.

Bazı durumlarda da zemin suları tuzlu bileşimde olabilir. Çevresel ve atmosfer etkilerine göre bu özellikte yağmur ve zemin suyuna sahip olan yörelerde özellikle tarihi yapıların büyük bir tehdit altında olduğu söylenebilir. Nitekim çoğu

yapılarda kullanılan doğal taşların bol gözenekli ve yüksek kılcal su emme potansiyeline sahip olması durumunda tuzlu bileşiklerden dolayı ayrışma ve yapısal tahribat kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle tarihi yapılarda kullanılan doğal taşların fiziko-mekanik özelliklerinin yanı sıra gözenek boyut dağılımı ve kılcal su emme miktarının yanı sıra tuz kristalleşmesine direncinin de bilinmesi gerekmektedir. Yapılarda su ve tuz kristallenmesi kaynaklı bozulmaların önlenmesi için doğal taşların özellikleri belirlendikten sonra gerekli koruma önlemlerinin alınması gerekmektedir. Çok rutubetli ortamlarda su itici ve koruyucu kimyasal maddeler kullanılmak suretiyle doğal taşların su emme miktarının azaltılması, dolayısıyla da tuz kristalleşmesinden dolayı oluşan tahribatların önlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

Angeli, M., Benavente, D., Bigas, J. P., Menendez, B., Hebert, R., David, C., 2008. Modification of the Porous Network by Salt Crystallization In Experimentally Weathered Sedimentary Stones. *Materials and Structures*, 41, 1091–1108.

Angeli, M., Hébert, R., Menéndez, B., David, C., Bigas, J.P., 2010. Influence of Temperature and Salt Concentration on the Salt Weathering of A Sedimentary Stone With Sodium Sulphate. *Engineering Geology*, 115, 193–199.

Beck, K., Al-Mukhtar, M., 2010. Evaluation of the Compatibility of Building Limestones From Salt Crystallization Experiments. *Geological Society, London, Special Publications*, 333, 111-118.

Benavente, D., Garcia del Cura, M. A., Fort, R., Ordonez, S., 1999. Thermodynamic Modelling of Changes Induced by Salt Pressure Crystallization in Porous Media of Stone. *Journal of Crystal Growth*, 204, 168-178.

Cueto, N., Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Garcíadel-Cura, M.A., 2009. Rock Fabric, Pore Geometry and Mineralogy Effects on Water Transport In Fractured Dolostones, *Engineering Geology*, 107, 1-15.

Çelik, M.Y., Sel, H., 2008. Afyondaki Tarihi Çeşmelerde Doğal Taş Kullanımı ve Restorasyonu. *MERSEM 2008 Türkiye VI. Mermer Sempozyumu*, (Editör: M. Ersoy vd) Afyon, 39-58.

Çelik, M.Y., Ergül, A., 2015. The Influence of the Water

Saturation on the Strength of Volcanic Tuffs Used As Building Stones. *Environ Earth Sci*, 74:3223–3239.

Çelik, M.Y., Akbulut, H., Ergül, A., 2014. Water Absorption Process Effect On Strength of Ayazini Tuff, Such As the Uniaxial Compressive Strength (Ucs), Flexural Strength and Freeze and Thaw Effect. *Environ Earth Sci*, 71:4247–4259.

Çelik, M.Y., Tan, G., 2016. Döğler (İhsaniye-Afyon) Tüflerinin Doğal Yapı Taşı Olarak Teknolojik Özellikleri ve Mevlevi (Türbe) Cami Restorasyonu. *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 19(4):399-408.

Çelik, M.Y., 2017. Afyonkarahisar Yöresi Tüflerinin Fiziko-Mekanik Özelliklerinin Ultrases Dalga Hızı ile İlişkinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(4): 961-970.

Dal, M., 2011. Pınarhisar kalkerleri ve Marmara Beyazı Mermerinde Tuzların Yıkıcı Etkileri. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 47-56.

Demir, İ., Başpınar, M.S., Görhan, G., 2006. Afyonkarahisar – Ayazini Tüflerinin Mekanik Özellikleri ve Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği. *MERSEM 2006 Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, 31-38.

Doehne, E., 1994. In Situ Dynamics of Sodium Sulfate Hydration and Dehydration in Stone Pores: Observations At High Magnification Using the Environmental Scanning Electron Microscope. Fassina, O. A. Z., editor, *the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*. (Venice, Italy): 143-150.

Flatt, R.J., 2002. Salt Damage in Porous Materials: How High Supersaturations Are Generated. *Journal of Crystal Growth*, 242:435–454.

Kadir, S., Karakaş, Z., 2000. Konya Miyosen Yaşlı Volkanik Birimlerin Mineralojik-Petrografik ve Jeokimyasal İncelemesi ile Neoform Kil Mineral Oluşumlarının İrdelenmesi. *MTA Dergisi*.122, 95-106.

Karaman, M.E., Kibici, Y., 2008. Temel Jeoloji Prensipleri. Belen Yayıncılık ve Matbaacılık, Ankara, 335 sf.

Kuşçu, M., Yıldız, A., 2001. Ayazini Tüflerinin Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması., *Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, Ed: Y. Kibici, İ.S. Büyüksağış, Afyon, 85-98.

Kavas, T., Çelik, M.Y., 2001. Ayazini (Afyon) Tüflerinin Çimento Sanayinde Tras Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Madencilik Dergisi*, 40(2), 39-46.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Woolley, A.R., 1992. The Construction of the Total Alkali-Silica Chemical Classification of Volcanic Rocks. *Miner. Petrol*, 46:1-22.,

- Klopper, H., Feuchte. In: Lutz P et al (eds) Lehrbuch der Bauphysik. Teubner, Stuttgart, pp 329–472. 1985.
- Öcal, D.A., Dal, M., 2012. Doğal Taşlardaki Bozunmalar,. Mimarlık Vakfı İktisadi İşletmesi, İstanbul.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez Navarro, C., 2007. The Role of Saline Solution Properties on Porous Limestone Salt Weathering By Magnesium And Sodium Sulfates. *Environ Geol*, 52:269–281.
- Siegesmund S., Dürrast H., 2011. Physical and Mechanical Properties of Rocks. In: Stone in Architecture, 4th Edition, Siegesmund S., Snethlage R. Eds., Berlin: Springer, pp. 97–225.
- Schmid, R., 1981. Descriptive Nomenclature and Classification of Pyroclastic Deposits and Fragments: Recommendations of the Lugs Subcommision on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, 9, 41-3. ISSN 1432-1149.
- Shahidzadeh-Bonn, N., Desarnaud, J., Bertrand, F., Chateau, X., Bonn, D., 2010. Damage in Porous Media Due to Salt Crystallization. *Physical Review*, E 81, 066110.
- Sperling, C.H.B., Cooke, R.U., 1985. Laboratory Simulation of Rock Weathering By Salt Crystallisation and Hydration Processes in Hot, Arid Environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 541-555.
- Stark, D.C., 2002. Performance of Concrete in Sulfate Environments. RD129, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 28 pp.
- TS EN 1936, 2010. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Porozite Tayini. TSE, Ankara, 10 s.
- TS EN 13755, 2014. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. TSE, Ankara, 10 s.
- TS EN 14579, 2006. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Ses Hızı İlerlemesinin Tayini. TSE, Ankara, 14 s.
- TS EN 1926, 2013. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini. TSE, Ankara, 19 s.
- TS EN 12370, 2001. Doğal Taşlar-Deney Metotları-Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini. TSE, Ankara, 8 s.
- Ünal, M., Özkan, İ., Kekeç, B., 2006. “Yapıtaşlarında Tuz Kristalleşmesine Bağlı Bozunmanın Ultrasonik Hız Ölçümleri ile Kestirimi. Mersem 2006, Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 431-437.
- Ünal, M., Gündoğdu, N., 2011. The Effect of Salt Crystallization On Tuff Used as Building Material. *e-Journal of New World Sciences Academy Engineering Sciences*, 6(1) 41-49.
- Vázquez, M. A., Galán, E., Ortiz, P., Ortiz, R., 2013. Digital Image Analysis and Edx Sem as Combined Techniques to Evaluate Salt Damp on Walls. *Construction and Building Materials*, 45, 95–105.
- Vazquez, P., Alonso, F.J., Esbert, R.M., Ordaz, J., 2010. Ornamental Granites: Relationship Between P-Waves Velocity, Water Capillary Absorption and Crack Network. *Construction and Building Materials*, 24, 2536-2541.



Orijinal Araştırma / Original Research

AŞINDIRICILI SUJETİYLE DOĞALTAŞ KESMEDE GRANİT ATIKLARININ AŞINDIRICI OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF GRANITE WASTES AS ABRASIVE IN NATURAL STONE CUTTING WITH ABRASIVE WATERJET

Gökhan Aydın^{a,*}, Serkan Kaya^{a,**}, İzzet Karakurt^{a,***}, Furkan Yıldırım^{a,****}

^a Karadeniz Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Trabzon, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 10 Mart / March 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 12 Haziran / June 2019

Anahtar Sözcükler:

Doğaltaşlar,
Granit atığı,
Aşındırıcı,
Aşındırıcılı sujeti.

ÖZ

Doğaltaş sektöründeki üretim ve işleme faaliyetleri sonucunda kayda değer miktarlarda atık oluşturulmaktadır. Bu atıklar, çeşitli çevresel problemlere (topografya değişikliği, yüzey/yeraltı sularında bozulma, hava/görüntü kirliliği vb.) yol açmaktadırlar. Bu çalışmada, granit atıklarının (iri ve ince boyutlu) aşındırıcılı sujeti ile (ASJ) doğaltaş kesmede aşındırıcı olarak kullanılabilme potansiyeli araştırılmıştır. Kesme deneylerinde kullanılan kireçtaşı örnekleri uzunlukları boyunca kesilmişlerdir. Kesme parametreleri deneyler süresince sabit değerlerde tutulmuş ve kesme performansının değerlendirilmesinde kesme derinliği referans alınmıştır. Çalışma sonuçları granit atıklarının sudan etkilenme, sertlik, dayanım, yoğunluk ve şekil açısından aşındırıcı olarak gereksinimleri karşıladığını göstermiştir. Bunun yanında, atık çamurundan elde edilen malzemelerin büyük çoğunluğunun (atık çamurunun %96'sı) ASJ ile doğaltaş kesimi için ihtiyaç duyulan boyutta olmadığı belirlenmiştir. Ek olarak, parça granit atıklarından kırma, öğütme ve eleme işlemleriyle elde edilen malzemenin aşındırıcı olarak kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

ABSTRACT

Considerable amounts of wastes are generated as a result of the production and processing operations in the natural stone sector. These wastes cause some environmental problems (topography change, surface/underground water pollution, air/visual pollution and so on). In this study, potential use of the granite wastes (coarse and fine size) as abrasive in natural stone cutting with abrasive waterjet (AWJ) are investigated. The limestone samples used in the tests are cut longitudinally. The cutting parameters are kept constant during the tests and the cutting depth is considered for assessing the cutting performance. The study results show that granite wastes meet the requirements as abrasive in terms of reaction with water, hardness, toughness and shape. Besides, it is determined that a great majority (96% of waste slurry) of the fine materials derived from the waste sludge doesn't have required size for natural stone cutting with the AWJ. Additionally, it is concluded that materials obtained from the coarse granite wastes by crushing, grinding and sieving could be used as abrasive.

Keywords:

Natural stones,
Granite waste,
Abrasive,
Abrasive waterjet.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: gaydin@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-6670-6458>

** serkan.kaya@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-2081-4445>

*** karakurt@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-3360-8712>

**** furkanyildirim@ktu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-8124-4469>

GİRİŞ

Bir veya birkaç mineralin bir araya gelmesiyle kayaçlar oluşur. Kayaçlar, oluşum şartlarına ve kökenlerine göre magmatik, tortul ve başkalaşım olmak üzere üç gruba ayrılabilir (Azizoğlu, 2005; Büyüksağış ve Gürçan, 2005; Aydın vd., 2013a). Diğer bütün taşların kökenini oluşturan mağmatik kayaçlar, bulunduğu yerden hareket eden mağmanın yeryüzünde/yeryüzüne yakın yerlerde katılmasında sonucunda oluşurlar. Bu kayaçlar, kristalli (taneli), tabakalanmasız ve kütleler halindedirler. Fosil içermezler ve asitten etkilenmezler. Tortul kayaçlar ise dış kuvvetlerin etkisiyle aşındırılan malzemelerin çukur yerlerde biriktirilip tortullaşmasıyla oluşurlar. Tortul kayaçlar tabakalı ve kristalsiz bir yapıdadırlar. Oluştukları zamana ait canlı kalıntıları (fosiller) içerirler ve asitten etkilenirler. Mağmatik ve tortul kayaçların yüksek sıcaklık ve basınç altında başkalaşmasıyla da metamorfik kayaçlar oluşur. Basınç ve sıcaklığın etkisiyle kayaçların fiziksel ve kimyasal yapıları değişir (sertleşir ve koyulaşır). Bu kayaçlar genellikle kristalli yapıya sahiptirler (Şentürk, 1996; Azizoğlu, 2005; Aydın vd., 2013b).

Ticari standartlara uygun boyutlarda blok verebilen ve kesilip parlatılabilen/yüzeyi işlenebilen kayaçlar (tortul, mağmatik ve metamorfik) "mermer" olarak isimlendirilmektedir (Çelik, 2001). Mermerler (Doğaltaşlar) geçmişten günümüze birçok alanda (Barınak/mezar/putların yapımında, mahsulleri öğütme için değirmenlerde, inşaat sektöründe iç ve dış yüzeylerin kaplanmasında vd.) kullanılmışlardır. Doğaltaş işletmeciliğinde planlama döneminden nihai ürün eldesine kadar geçen süreçlerde çeşitli işlemler uygulanmaktadır. Doğaltaş işletmeciliğinin planlama döneminde, üretimde teknolojisi ve kullanılacak donanımlar belirlenir. Bu dönemi takiben hazırlık çalışmaları yürütülür. Çalışma alanının temizlenmesi, delme/kesme parametrelerinin belirlenmesi, deliklerin açılması (delme çatlatma ve elmas telle kesme yöntemlerinde) ve rayların yere sabitlenmesi (zincirli kollu kesicilerle kesme yönteminde) gibi faaliyetler hazırlık çalışmaları olarak değerlendirilebilir. Blokların üretilmesinde, delme çatlatma, elmas telle kesme, zincirli kollu kesicilerle kesme ve bu yöntemlerin kombinasyonu kullanılır. Kesme işlemi tamamlanan kütleler, ana kayaçtan bir miktar ileriye ötelenir, devrilir ve dilimleme aşamasına geçilir.

Kesme yöntemlerinden biri kullanılarak kütle daha küçük ebatlı bloklara (dilimleme) ayrılır. Bloklar uygun nakliye araçlarıyla taşınarak çeşitli alanlarda depolanırlar. Kesme (istenilen kalınlıkta kesme ve kenar-baş kesme), cilalanma/eskitme işlemleri ile de bloklardan levhalar üretilir (Ersoy, 2010; Aydın vd., 2012; Celep vd., 2013).

Yukarıda bahsedilen faaliyetlere bağlı olarak üretimin %40-70'i oranında doğaltaş atığı meydana getirilmektedir (Ural ve Yakşe, 2015; Aydın vd., 2013c; Aydın vd., 2013d; Soltan vd., 2016). Bu atıklar, boyutlarına göre iri (ocaktaki üretimin yaklaşık %40'ı) ve ince (fabrikalarda işlenen doğal taşların yaklaşık %30'u) atıklar olarak sınıflandırılmaktadır. Atık miktarı, doğaltaşın mineralojisine, süreksizlik/çatlak yapısına, üretim ve işleme faaliyetlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Yıldız, 2008; Şentürk vd., 1996; Aydın vd., 2014; Aydın vd., 2015). Bu atıklar, pasa döküm sahalarında (doğaltaş işletme sahası ve doğaltaş yataklarından uzak bölgelerdeki araziler) depolanmaktadır. İşletme sahasının depo alanı olarak kullanılması durumunda sahada ki manevra kabiliyeti azalmaktadır (Aydın, 2014; Aydın, 2015). Atıkların başka bir alanda depolanması durumunda ise nakliyeden ötürü ek maliyetler söz konusu olmaktadır (Cavuş, 2015; Aydın vd., 2017). Doğaltaş atıkları, topografya değişikliği, toprak işgali, yüzey/yeraltı sularında bozulma, hava ve görüntü kirliliği gibi çevresel etkiler yaratmaktadır (Görgün ve Ural, 2015; Akbulut ve Gürer, 2006; Ural ve Yakşe, 2015). Bu etkilerin önüne geçebilmek adına doğaltaş atıklarının farklı alanlarda kullanımına yönelik çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Aşağıda bu çalışmalar, doğal taş atıklarının kullanım alanları referans alınarak gruplandırılmış ve içerikleri hakkında bilgilendirmelerde bulunulmuştur.

I. Tuğla, kiremit ve fayans üretimi: Menezes vd. (2008), granit atıklarının geleneksel seramik hammaddeleri ile fiziksel ve mineralojik açıdan benzer özelliklere sahip olduğunu göstermişlerdir. Torres vd. (2009) %10 granit atığı içerikli kiremitin su emme, piroplastik deformasyon indeksi ve eğilme dayanımı açısından mükemmel özellikler sunduğunu belirlemişlerdir. Dhanapandian vd. (2009) tuğla bileşimine belirli oranlarda atık (granit ve mermer kesme atıklarının) eklenmesiyle birim hacim ağırlık, basma dayanımı ve eğilme dayanımının arttığını göstermişlerdir. Marras vd., (2010) tuğla

üretiminde diğer geleneksel bileşimlerle beraber atık mermer tozunun kullanımıyla tuğla kalitesinin iyileştirilebileceğini göstermişlerdir. Hojamberdiev vd. (2011) granit atıklarının bileşimlerine bağlı olarak fayans üretiminde kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Bilgin vd. (2012), nihai ürünün teknik özelliklerini etkilemeden %10'luk mermer tozunun tuğla harcına eklenebileceğini göstermişlerdir. Cobo-Ceacero vd. (2019), tuğla bileşimine mermer atığı eklemenin (%0-10 aralığında) görünür poroziteyi arttırdığı, yoğunluk ve basma dayanımı azalttığını belirlemişlerdir.

II. Asfalt malzemesi olarak kullanımı: Akbulut ve Gürer (2007) mermer atıklarından elde edilen agregaların hafif ve orta trafikli asfalt kaplamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Karakuş (2011) ince ve iri bazalt atıklarının özelliklerinin agrega olarak spesifik limitler içerisinde olduğu sonucuna ulaşmıştır. Ural ve Yakşe (2015) mermer atıklarının, yol temel malzemesi olarak kullanımı için gereken fiziksel özellikleri sağladığını tespit etmişlerdir.

III. Beton üretimi: Binici vd. (2007) mermer ve kireçtaşı tozları içeren betonlarının aşınma dirençlerinin geleneksel betona benzediğini tespit etmişlerdir. Aruntaş vd. (2010) çimento üretiminde atık mermer tozunun katkı maddesi olarak (%10) kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Hebhouh vd. (2011) mermer atıkları kullanarak hazırladıkları betonun mekanik özelliklerinin beton üretim standartlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Vijayalakshmi vd. (2012) %15 oranına kadar granit toz atığının kum ile kısmi yer değiştirmesinin betonun mekanik özelliklerini etkilemediğini göstermişlerdir. Sadek vd. (2016) kendiliğinden yerleşen betonda doğaltaş tozlarının mineral katkıları olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir. Singh vd. (2016), granit kesme atığı ile ince agreganın optimum değişim oranını yaklaşık %30 olarak elde etmişlerdir. Çalışmada, betonun performansının bu değişim seviyelerinde önemli bir şekilde arttığı not edilmiştir. Ghannam vd. (2016) granit tozunun kum ile %10 oranındaki değişimlerinde elde edilen betonun basma ve eğilme dayanımı açısından en iyi sonuçları verdiğini belirlemişlerdir.

IV. Diğer: Tozsın vd. (2014) mermer atıklarının asidik toprağın nötralizasyonu üzerine önemli bir etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. Marras vd. (2017) mermer atıklarının hafif iyileştirmeler ile farklı endüstriyel uygulamalarda bir hammadde

olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Sarici ve Özdemir (2018) granit atıklarının sedimanter kökenli kayalarda aşındırıcı malzeme olarak etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Buyuksagıs vd. (2017), mermer atık tozunun manto, dekoratif alçı ve fayans yapıştırma harçlarında kullanılabileceğini tespit etmişlerdir.

İlgili literatürden anlaşılabilirliği üzere, doğaltaş atıklarının değerlendirilmesine yönelik çalışmalar başlıca atıklarının asfalt malzemesi, tuğla-kiremit-fayans ve beton üretiminde bir bileşen olarak kullanımlarının üzerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada, ilgili çalışmalardan farklı olarak, ASJ ile doğaltaş kesmede granit atıklarının kullanılabilirliği irdelenmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Parça atık olarak, önceki laboratuvar çalışmalarından arda kalan iri boyutlu granit atıkları değerlendirilmiştir. Bu malzeme üzerinde kırma, öğütme ve eleme işlemleri uygulanarak çalışma gereksinimlerine (+150-300µm) uygun boyutlarda malzemeler elde edilmiştir. İnce boyutlu granit atıkları ise Trabzon'da faaliyet gösteren bir granit fabrikasının atık çamurundan elde edilmiştir. Fabrikada, blok doğal taşlar katarlarla levha şeklinde kesilmektedir. Kesilen doğal taş parça/tozları suya karışarak uzaklaşmaktadır. Bu şekilde kirlenen atık sular, çöktürme havuzunda bekletilerek, çökebilir katı maddelerin çöktürülmesi sağlanmaktadır. Havuzun üst kısmındaki su filtreden geçirilerek sisteme geri beslenmektedir. Filtre presten çıkan çamur ile çöktürme havuzunun dibinde kalan çamur atık sahasına boşaltılmaktadır. Çalışmada kullanılan çamur, bu atık sahasının çeşitli noktalardan alınmıştır. Atık çamurundan elde edilen örnek etüvde 105 °C'de kurutulmuş ve boyut dağılımının belirlenebilmesi adına eleme işlemine tabi tutulmuştur.

ASJ ile kayaç kesme gereksinimlerini sağlayan atık türü/türleri (parça/toz) kullanılarak kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Atık malzemenin kesme performansının karşılaştırılması olarak değerlendirilmesi için aynı koşullarında garnetin kesme performansı da irdelenmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan kireçtaşı örneklerinin (3x10x20 cm) bazı fiziko-mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Crema Eda kireçtaşının bazı özellikleri (Aydın vd., 2017)

Standart	Özellik	Değer
ASTM-C170	Tek eksenli sıkışma dayanımı	88,80 MPa
ASTM-C880	Eğilme dayanımı	8,85 MPa
ASTM-C97	Yoğunluk	2,68 g/cm ³
ASTM-C97	Su emme	%0,19

DeneySEL çalışmalarında Şekil 1'de sunulan ASJ kullanılmıştır. Bu ASJ'ye ait bazı özellikler Çizelge 2'de sunulmaktadır. Kireçtaşı örnekleri uzun eksenlerine paralel olarak kesilmişlerdir. Kesme parametreleri deneyler süresince sabit değerlerde tutulmuştur (Kesme hızı: 100 m/min, Aşındırıcı besleme miktarı: 350 g/min, Meme-örnek mesafesi: 4 mm ve Pompa basıncı: 200 MPa). Garnet ve granit atığının (öğütülmüş) yoğunluğu ilgili standart referans alınarak sırasıyla 4 g/cm³ ve 2.65 g/cm³ olarak belirlenmiştir (ASTM D854-14).



Şekil 1. DeneySEL çalışmalarında kullanılan ASJ

Aşındırıcıların performanslarının değerlendirilmesi için kesme derinliği referans alınmıştır. Bilindiği gibi kesme derinliği, ASJ'nin kesme performansını belirleyen en önemli göstergelerden birisidir. Kesim yüzeyi ile kesilen malzemenin içine doğru oluşan yarığın (kesiğin) en dip noktası arasındaki dikey mesafeyi ifade etmektedir. Kesme derinliğinin artması iyi bir kesme performansına işaret etmektedir. Kireçtaşı örnekleri üzerinde elde edilen kesme derinliklerinin ölçülebilmesi için örnekler kesildikleri hatlar boyunca iki eşit

parçaya ayrılmışlardır. Her bir aşındırıcı için kesme hattı boyunca dijital kumpas kullanılarak 7 farklı noktadan kesme derinliği ölçülmüştür. İlgili değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak nihai kesme derinlikleri belirlenmiştir.

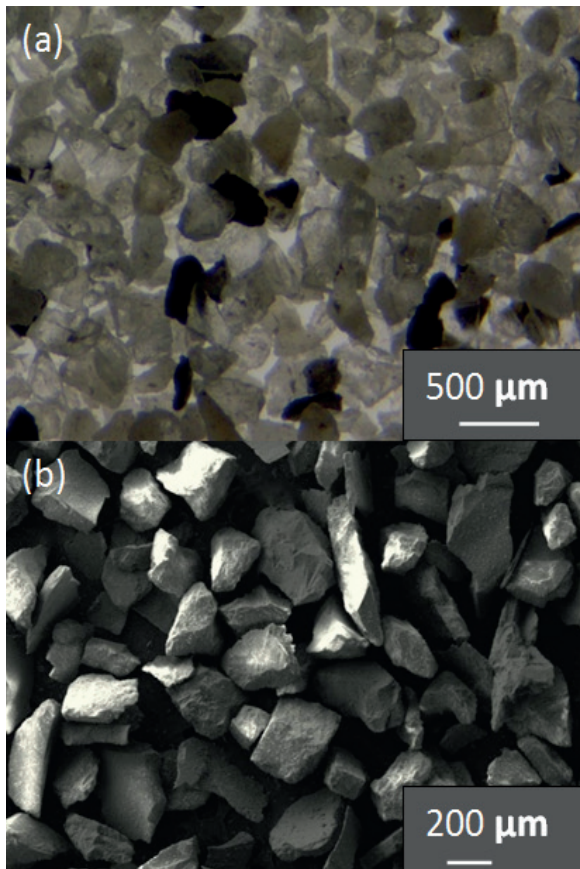
Çizelge 2. DeneySEL çalışmalarda kullanılan ASJ'ne ait bazı özellikler

Özellik	Model/Değer
Konsol tip	S-HP boşluksuz vidalı mil-Yüksek performans
CNC kontrol sistemi	Siemens
Maksimum pozisyonlanma hızı	PH _{max} : 30000 mm/min
Maksimum hatasız kesme hızı	KH _{max} : 12000 mm/min
Tekrarlama hassasiyeti	0,03 mm
Yüksek basınç sistemi	Pompa: KMT 50 HP, Kesme kafası: KMT
Basınç (Nominal-Süreklili)	413,6-400 MPa
Pompa debisi	Max. 3,8 l/min
Aşındırıcı tüketimi	100-400 g/min
Nozül çapı-uzunluğu	1,1-75 mm
Orifis çapı	0,33 mm

2. BULGULAR VE TARTIŞMA

ASJ'nin kesme performansı aşındırıcının çeşitli özelliklerinden etkilenmektedir (Rapple, 2014; Karakurt vd., 2013a). Herhangi bir malzemenin kesilmesinde uygun aşındırıcı tipinin belirlenebilmesi için aşındırıcıların su ile reaksiyon, sertlik, dayanım, yoğunluk, şekil ve boyut açısından gereksinimleri karşılaması gerekmektedir (Karakurt vd., 2011; Karakurt vd., 2012; Fowler vd., 2009). Granit atıklarının belirtilen durumlar açısından irdelenmesiyle aşındırıcı olarak kullanım potansiyelleri belirlenebilir. Bilindiği gibi granitler başlıca feldispat, kuvars ve plajiyoklas gibi minerallerden oluşmaktadır. Bu açıdan granit atıklarının bileşiminde su ile reaksiyona girecek herhangi bir mineralin bulunmadığı söylenebilir. Bunun yanında, granitin bileşiminde bulunan başlıca kayaç yapıcı minerallerin her birinin sertliği (Mohs

Sertliği; K-feldispat: 6-6,5; Kuvars: 7; Plajiolklas: 6-6,5) 6'nın üzerindedir. Bu sertlik değeri, garnetin sertliğine (yaklaşık 7) yakın bir değer olarak dikkat çekmektedir. Ayrıca, çok kırılğan ve çok sağlam olan aşındırıcılarla yürütülen kesme işleminde çeşitli problemler yaşanabilmekte (odaklama tüpünde parçalanma, aşındırıcıların körelmesi vd.) ve kesme performansı kötüleşmektedir (Labus vd., 1991; Babu ve Chety, 2002). Granitin mineralojik bileşiminin dayanım açısından ihtiyaç duyulan kriterleri karşılayacağı düşünülmektedir. Granit atıklarının tane şekillerinin ise garnet ile benzer özelliklere sahip olduğu söylenebilir (Şekil 2).



Şekil 2. Granit atığının mikroskop (a) ve taramalı elektron mikroskobu (b) görüntüleri

Aşındırıcıların etkin bir şekilde kesme yapabilmesi için belirli bir boyuta sahip olmaları gerekmektedir (Karakurt vd., 2013b). Aşağıda, ASJ kesme uygulamalarında yaygın kullanıma sahip garnetin (80 mesh) boyut dağılımı sunulmaktadır. Anlaşılacağı gibi aşındırıcı boyutunun büyük bir kısmı (%99) 150 µm'nin üzerindedir (Çizelge 3).

Çizelge 3. Garnete ait elek analizi sonucu

Boyut aralığı (µm)	+300	-300	-212	-150
Örnek ağırlığı (g)	10,58	125,54	61,02	1,60
%	5,32	63,17	30,70	0,81

Kontrollü bir şekilde kırma öğütme aşamalarından geçen iri boyutlu granit atıklarından bu boyutlarda malzemeler elde edilmiştir. Kurutulan atık çamurunun ise kayda değer bir miktarının (%43) su olduğu tespit edilmiştir (Çizelge 4). ASJ işlemlerinde kullanılacak olan boyut aralığında ise çok az miktarda malzeme elde edilmiştir (Çizelge 5). 250 µm'den daha büyük boyuta sahip malzemeler öğütme ve eleme işlemlerinden geçirilip arzulanan boyuttaki (-250 µm + 125 µm) malzeme miktarı artırılabilir. Ancak, bu işlemde de malzemenin bir kısmının 125 µm elek altına geçeceği düşünülmektedir. Bu durumda bile, tüm malzemenin %20'sinden daha azı istenilen boyutlarda elde edilebilecektir. Ayrıca, 250 µm elek üstünde kalan malzemede yoğun miktarda sert ve kahverengi malzemelerin (oksitlenmiş grit parçaları) varlığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak, atık çamurundan elde edilen malzemenin boyutu istenilen düzeyde değildir. Bu bakımdan, fabrikadan elde edilen atık çamurunun ASJ'nde aşındırıcı olarak değerlendirilmesi uygun olmayacaktır. Bu sebeple, takip eden kısımlarda sadece öğütülmüş granit atıkları ve garnetin kesme performansı irdelenmiştir.

Çizelge 4. Granit atık çamurunun kurutulması sonucu ağırlık kaybı

Örnek ağırlığı (g)	Çamur numune	Etüv sonrası
(g)	10875,54	6238
%	100	57,36

Çizelge 5. Granit atık çamurunun elek analizi sonucu

Boyut aralığı (µm)	+250	-250 + 125	-125
Örnek ağırlığı (g)	2772,4	452,4	3013,2
Atık çamuru ağırlığının yüzdesi	25,49	4,16	27,7

Aşındırıcıların kesme performansları Çizelge 6'da sunulmaktadır. Anlaşılacağı gibi garnet ile gerçekleştirilen kesimlerde granit atığına göre daha yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir. Karakurt vd. (2014) yoğunluğu düşük aşındırıcıların yüksek olanlara göre enerjilerini daha kolay kaybedeceğini belirtmişlerdir. Benzer bulgular Aydın vd. (2013) tarafından da desteklenmiştir. Garnetin yoğunluğu granit atığının yoğunluğundan daha yüksektir. Bu durum garnetin daha iyi bir performans sergilemesine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, Axinte vd. (2009) düşük sertliğe sahip aşındırıcılarla düşük kesme derinliklerinin elde edileceğini belirtmişlerdir. Bu kapsamda garnete oranla nispeten daha düşük sertlikli bileşenlere sahip atığın böyle bir performans sergilediği söylenebilir. Garnet ile daha yüksek kesme performansı elde edilmesine rağmen granit atığı ile elde edilen kesme derinlikleri de tatminkar düzeydedir. Özellikle bir atığın bu kapsamda değerlendirilmesi açısından sonuçlar umut vericidir.

Çizelge 6. Aşındırıcıların kesme performansları

Aşındırıcı	Ort. Kesme der. (mm)	Standart sapma
Garnet	15,26	0,97
Granit atığı	10,43	0,93

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal taş ocaklarda ve fabrikalarında yürütülen faaliyetler sonucunda üretimin %40-70'i oranında iri ve ince boyutlu atık meydana getirilmektedir. Bu çalışmada granit atıklarının ASJ ile mermer kesmede aşındırıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

I. Granit atıklarının bileşiminde su ile reaksiyon gösteren herhangi bir bileşenin bulunmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu atıkların, sertlik, dayanım, yoğunluk ve şekilsel özellikler açısından gereksinimleri karşıladığı belirlenmiştir.

II. Etkin bir kesim için aşındırıcının boyutunun -300+150 µm aralığında olması gerekmektedir. Çalışma sonuçları, parça granit atıklarının kırma, öğütme ve eleme işlemleriyle bu boyutlara

getirilebileceğini göstermiştir. Atık çamurundan elde edilen toz boyutundaki malzemenin ise yalnızca %4'lük bir kısmının belirtilen boyutlara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bakımdan, fabrikadan elde edilen atık çamurunun ASJ'nde aşındırıcı olarak değerlendirilmesinin uygun olmayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

III. Granit atığıyla (parçalanmış) gerçekleştirilen kesimlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Garnete oranla tatminkar kesme derinlikleri elde edilmiştir. Sonuçlar, granit atıklarının ASJ ile kayaç kesmede aşındırıcı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Granit atığının (parçalanmış) garnete göre biraz daha sığ kesim gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu durumda, granit atığı kullanılarak gerçekleştirilecek endüstriyel kesme uygulamalarında aynı kesme derinliğine erişmek için kesme hızının düşürülmesi ya da ikinci bir kez aynı kesme hattı boyunca ilerleme yapılması gerekecektir. Her iki durumda da enerji tüketimi daha fazla olacaktır. Maliyet perspektifinden bakılarak malzemeler için (granit atığı ve garnet) hammadde ve enerji maliyetleri karşılaştırılabilir. Ek olarak, bu çalışmada sabit kesme parametreleri altında kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Granit atığının farklı kesme parametrelerinde kesme performansı incelenebilir. Ayrıca, granit bileşiminin kesme performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, H., Güner, C., 2006. Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agregata Olarak Değerlendirilmesi. İMO Teknik Dergi, 3943-3960, Yazı 261.
- Akbulut, H., Güner, C., 2007. Use of Aggregates Produced from Marble Quarry Waste in Asphalt Pavements. Building and Environment, 42, 1921-1930.
- Aruntaş, H.Y., Guru, M., Dayı, M., Tekin, I., 2010. Utilization of Waste Marble Dust as an Additive in Cement Production. Materials and Design, 31, 4039-4042.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Aydın, K., 2012. Performance of Abrasive Waterjet in Granite Cutting: Influence of the Textural Properties. Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (7), 944-949.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Aydın, K., 2013a. Prediction of Cut Depth of the Granitic Rocks Machined by

- Abrasive Waterjet (AWJ). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46 (5), 1223-1235.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Aydiner, K., 2013b. Wear Performance of Saw Blades in Processing of Granitic Rocks and Development of Models for Wear estimation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46 (6), 1559-157.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Aydiner, K., 2013c. Investigation of the Surface Roughness of Rocks Sawn by Diamond Sawblades. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 171-182.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Aydiner, K., 2013d. Development of Predictive Models for Specific Energy of Circular Diamond Sawblades in Sawing of Granitic Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46 (4), 767-783.
- Aydın, G., 2014. Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting with Different Types of Granite. *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (10), 4425-4435.
- Aydın, G., 2015. Performance of Recycling Abrasives in Rock Cutting by Abrasive Waterjet. *Journal of Central South University*, 22 (3), 1055-1061.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Hamzaçebi, C., 2014. Artificial Neural Network and Regression Models for Performance Prediction of Abrasive Waterjet in Rock Cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 1321-1330.
- Aydın G, Karakurt İ, Hamzaçebi C, 2015. Performance Prediction of Diamond Sawblades using Artificial Neural Network and Regression Analysis. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 40, 2003-2012.
- Aydın, G., Kaya, S., Karakurt, İ., 2017. Utilization of Solid-Cutting Waste of Granite as an Alternative Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting of Marble. *Journal of Cleaner Production*, 159, 241-247.
- Azizoğlu, M.S., 2005. Çukurova Bölgesindeki Mermer Ocaklarının Pazar Durumu ve Ekonomik Açidan Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 114 s.
- Babu, M.K., Chetty, O.V.K., 2002. Studies on Recharging of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 697-703.
- Binici, H., Kaplan, H., Yılmaz, S., 2007. Influence of Marble and Limestone Dusts as Additives on Some Mechanical Properties of Concrete. *Scientific Research and Essay*, 2 (9), 372-379.
- Buyuksagis, I.S., Uygunoglu, T., Tatar, E., 2017. Investigation on the Usage of Waste Marble Powder in Cement-Based Adhesive Mortar. *Construction and Building Materials* 154, 734-742.
- Büyüksağış, İ.S., Gürcan., S., 2005. ASTM ve TSE Doğal Taş Standartlarının Karşılaştırılması. *Madencilik*, 44 (1), 33-41.
- Celep, O., Aydın, G., Karakurt, İ., 2013. Diamond Recovery from Waste Sawblades: A Preliminary Investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227, 417-421.
- Çelik, M.Y., 2001. İsehisar (Afyon) Mermer Atıklarının Hayvan Yemi Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, 3-5 Mayıs 2001, Afyon, 309-316.
- Cobo-Ceacero, C.J.C., Cotes-Palomino, M.T., Martínez-García, C., Moreno-Maroto, J.M., Uceda-Rodríguez, M., 2018. Use of Marble Sludge Waste in the Manufacture of Eco-Friendly Materials: Applying the Principles of the Circular Economy. Erişim Tarihi 09 Ocak 2019 http://uest.ntua.gr/naxos2018/proceedings/pdf/119_NAXOS2018_CoboCeacero_etal.pdf
- Çavuş, U.Ş., 2015. Mermer Parça Atıklarının Taşkın Koruma ve Akarsu Yatakları İslah Yapılarında Kullanımı. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15, 19-28
- Dhanapandian, S., Gnanavel, B., Ramkumar, T., 2009. Utilization of Granite and Marble Sawing Powder Wastes as Brick Materials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 4 (2), 147-160.
- Ersoy, M., 2010. Mermer Ocaklarında Delme Çatlatma Yönteminde Üretim Planlaması ve Hesap Çizelgesi Programında Uygulanması. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 3 (1), 23-34.
- Fowler, G., Pashby, I.R., Shipway, P.H., 2009. The Effect of Particle Hardness and Shape when Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V. *Wear*, 266, 613-620.
- Ghannam, S., Najm, H., Vasconez, R., 2016. Experimental Study of Concrete made with Granite and Iron Powders as Partial Replacement of Sand. *Sustainable Materials and Technologies*, 9, 1-9.
- Görgün, B., Ural, N., 2015. Mermer Atığının Geoteknik Mühendisliğinde Kullanılması. II. International Sustainable Buildings Symposium, 28-30 May 2015, Ankara, Turkey, 219-132.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., Ghorbel, E., 2011. Use of Waste Marble Aggregates in Concrete. *Construction and Building Materials* 25, 1167-1171.
- Hojamberdiev, M., Eminov, A., Xu, Y., 2011. Utilization of Muscovite Granite Waste in the Manufacture of

Ceramic Tiles. *Ceramics International*, 37, 871–876.

Karakurt, İ., Aydın, G., Aydın, K., 2011. Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ). *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 18 (6), 435-442.

Karakurt, İ., Aydın, G., Aydın, K., 2012. A study on the Prediction of Kerf Angle in Abrasive Waterjet Machining of Rocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226, 1489-1499.

Karakurt İ., Aydın G, Aydın K, 2013a. Predictive Modelling of Noise Level Generated during Sawing of Rocks by Circular Diamond Sawblades. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Science*, 38 (3), 491-511.

Karakurt İ, Aydın G, Aydın K, 2013b. Experimental and Statistical Analysis of Cutting Force Acting on Diamond Sawblade in Sawing of Granitic Rocks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 227, 286-300.

Karakurt, İ., Aydın, G., Aydın, K., 2014. An Investigation on the Kerf Width in Abrasive Waterjet Cutting of Granitic Rocks. *Arabian Journal of Geosciences*, 7 (7), 2923-2932.

Karakuş, A., 2011. Investigating on Possible Use of Diyarbakir Basalt Waste in Stone Mastic Asphalt. *Construction and Building Materials*, 25, 3502-3507.

Labus, T.J., Neusen, K.F., Alberts, D.G., Gores, T.J., 1991. Factors Influencing the Particle Size Distribution in an Abrasive Waterjet. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry* 113, 402-411.

Marras, G., Careddu, N., Siotto, G., 2010. Recovery and Reuse of Marble Powder by-Product. *Global Stone Congress 2010*, 2-5 March 2010, Alicante, Spain, 1-5.

Marras, G., Bortolussi, A., Peretti, R., Careddu, N., 2017. Characterization Methodology for Re-Using Marble Slurry in Industrial Applications. *Energy Procedia*, 125, 656-665

Menezes, R.R., Ferreira, H.S., Neves, G.A., Ferreira, H.C., 2008. Use of Granite Sawing Waste in the Production of Ceramic Bricks and Tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 25 (7), 1149-1158.

Rapelle, R.R., 2014. Selecting the Right Waterjet Abrasive. *The Fabricator*. Erişim Tarihi 07 Ekim 2016 [http://](http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/selecting-the-right-waterjetabrasive)

www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/selecting-the-right-waterjetabrasive

Sadek, D.M., El-Attar, M.M., Ali, H.A., 2016. Reusing of Marble and Granite Powders in Self-Compacting Concrete for Sustainable Development. *Journal of Cleaner Production*, 121, 19-32.

Sarici, D.E., Ozdemir, E., 2018. Utilization of Granite Waste as Alternative Abrasive Material in Marble Grinding Processes. *Journal of Cleaner Production*, 201, 516-525.

Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., Nagar, R., 2016. Performance of Sustainable Concrete Containing Granite Cutting Waste. *Journal of Cleaner Production*, 119, 86–98.

Soltan, A.M.M., Kahl, W., El-Raouf, F.A., Abdel-Hamid, B., 2016. Lightweight Aggregates from Mixtures of Granite Wastes with Clay. *Journal of Cleaner Production*, 117, 139–149.

Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y.İ., Sarıışık, A., 1996. *Mermer Teknolojisi*. Tuğra Offset, Isparta, 242 s.

Torres, P., Fernandes, H.R., Olhero, S., Ferreira, J.M.F., Torres, P., Fernandes, H.R., Olhero, S., Ferreira, J.M.F., 2009. Incorporation of Wastes from Granite Rock Cutting and Polishing Industries to Produce Roof Tiles. *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 23–30.

Tozsın, G., Oztas, T., Arol, A.I., Kalkan, E., Duyar, O., 2014. The Effects of Marble Wastes on Soil Properties and Hazelnut Yield. *Journal of Cleaner Production*, 81, 146-149.

Ural, N., Yakşe, G., 2015. Atık Mermer Parçalarının Yol Temel Malzemesi olarak Değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 53-62.

Vijayalakshmi, M., Sekar, A.S.S., Sivabharathy, M., Ganesh Prabhu, G., 2012. Utilization of Granite Powder Waste in Concrete Production. *Defect and Diffusion Forum*, 330, 49–61.

Yıldız, A.H., 2008. Mermer Toz Atıklarının Yol İnşaatında Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 194 s.



Orijinal Araştırma / Original Research

TOPLAM RENK FARKLILIĞI PARAMETRESİ KULLANILARAK BULANIK MANTIK YÖNTEMİYLE İSTATİSTİKSEL KALİTE KONTROLÜ: ALÜMİNYUM ÜRETİM TESİSİNDE BİR UYGULAMA

STATISTICAL QUALITY CONTROL WITH FUZZY LOGIC METHOD USING TOTAL COLOR DIFFERENCE PARAMETER: AN APPLICATION IN ALUMINUM PRODUCTION PLANT

Volkan Arslan^{a,*}

^a Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Orta Anadolu II. Bölge Müdürlüğü, Konya, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 18 Eylül / September 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 06 Nisan / April 2019

Anahtar Sözcükler:

Bulanık kontrol kartları,
İstatistiksel kalite kontrolü,
Proses yeterlilik indeksi,
Alüminyum,
Toplam renk farklılığı.

ÖZ

Üretim sürecini izlemek için bulanık bir ortalama ve değişim aralığı kontrol çizelgeleri kullanılmıştır. Bulanık kontrol grafikleri, fabrikadan veri toplayarak ve bunu prosesin izlenmesi için fabrika tarafından zaten uygulanmış olan geleneksel Shewhart kontrol grafikleri ile karşılaştırarak, alüminyum üretim tesisindeki bir vaka çalışması ile doğrulanmıştır. Sonuçlar, önerilen bulanık kontrol grafiklerinin, üretim sürecindeki anormal değişimleri, geleneksel Shewhart kontrol listelerinden daha doğru bir şekilde tespit edebildiğini, çünkü süreçten daha fazla bilgi kullandıklarını ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, Eti Alüminyum A.Ş. alüminyum üretim tesisinde bulanık mantık istatistiksel kalite kontrol uygulaması yapılmıştır. Toplam renk farkı parametresi (ΔE) verileri, alüminyum üretim tesisinde bulanık gözlem yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu amaçla, alüminyum üretim tesisi ürünlerinin renk parametreleri, ilgili formüller yardımıyla hesaplanan bulanık üçgen sayılar (TFN) ve bulanık süreç yeterlilik indeksleri (PCI) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen bilgilerle üretim sürecinin yeterli olup olmadığını tespit etmek amacıyla proses yeterlilik analizi yapılmıştır. Cp, Cpu ve Cpl indisleri sırası ile 1,267, 1,263, 1,257; 1,419, 1,414, 1,408 ve 1,115, 1,111, 1,106 bulunmuştur. Bu değerlere göre prosesin ihtiyaçları karşıladığı tespit edilmiştir.

ABSTRACT

Keywords:

Fuzzy control charts,
Statistical process control,
Process capability indices,
Aluminium,
Total color difference.

A fuzzy mean and range control charts were used to monitor the production process. Fuzzy control charts were validated through a case study at the aluminum production company by collecting data from the factory and comparing it to the traditional Shewhart control charts which have been already applied by the factory for monitoring the process. The results reveal that the proposed fuzzy control charts could detect abnormal shifts in the production process more accurately than the traditional Shewhart control charts, as they had used more information from the process.

In this study, fuzzy statistical quality control application was applied to Eti Aluminum Co. aluminum production plant. Total color difference parameter (ΔE) data were studied using fuzzy observation on an aluminum production plant. For this purpose, color parameters of the aluminum production plant were evaluated using triangular fuzzy number (TFN) and fuzzy process capability indices (PCIs). Process capability analysis was carried out to determine whether there was sufficient of the production process with the information obtained. The Cp, Cpu and Cpl indices were 1.267, 1.263, 1.257; 1.419, 1.414, 1.408 and 1.115, 1.111, 1.106, respectively. According to these values, it has been determined that the processes meet the needs.

* Sorumlu yazar / Corresponding author : volkanarslan76@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0002-5594-1495>

GİRİŞ

Alüminyum üretiminin başlangıç hammaddesi alüminadır. Alüminanın (Al_2O_3) günümüzde %90'dan fazlası boksit cevherlerinden elde edilmektedir (Aksu, 2001). Boksit cevherleri ihtiva ettiği alümina mineralleri bakımından farklı sınıflandırılmaya tabi tutulmuştur. Boksit cevherleri alüminyum içeren mineraller gibsit, böhmit ve diyorit mineralleridir. Gibsit kimyasal formülü $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$, monoklinik kristal yapılı ve 2,5-3,5 sertliktedir. Böhmit kimyasal formülü $Al_2O_3 \cdot H_2O$, ortorombik kristal yapılı ve 3,5-6,5 sertliktedir. Diyorit kimyasal formülü $Al_2O_3 \cdot H_2O$, ortorombik kristal yapılı ve 6,5-7 sertliktedir (Bayça ve Kısık, 2015).

Alüminyum, bronz, bakır, kurşun ve demir gibi yüzyıllardır bilinen ve üretilen malzemelere göre çok daha yeni bir malzeme olmasına karşın günümüzde demirden sonra en çok kullanılan metaldir. Yapılan araştırmalara göre alüminyum kullanımının 2017 yılında yaklaşık 63.4 milyon tondan daha fazladır (Aydın, 2002; Dwight, 2002; Chen ve Lui, 2005; IAI, 2018). Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme, bu metalin mükemmel bir karakteristiğe sahip olmasından ileri gelmektedir. Bu karakteristik alüminyum çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri haline getirmektedir. Alüminyum alaşımlarının hafifliği dışında yüksek korozyon dayanımı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, ışığı yansıtma özelliği, düşük sıcaklıklardaki dayanımı ve geri dönüşüm özellikleri gibi avantajları da mevcuttur (Kissel ve Ferry, 2002; Günay, 2006; Uslu ve ark., 2017).

Alüminyum üretim tesislerinde ürün kalitesini etkileyen parametrelerden biri de renktir. Kompleks kristal kimyası olan polimineral doğal numunelerde, renk çalışması yaygın yansıma spektroskopisi tekniklerinin kullanıldığı yüksek saflıkta (hatta sentetik olan) minerallerden daha karmaşıktır (Burns, 1993; Murray, 2002). Bu yüzden Uluslararası Eclairage Komisyonu (CIE) adlı bir kuruluş, rengi ölçmek için dünya çapında kullanılan standart değerleri belirlemiştir. CIE tarafından kullanılan değerler L^* , a^* ve b^* olarak adlandırılır ve renk ölçüm yöntemi CIELab olarak bilinmektedir. L^* sembolü, $L^* = 100$ ise parlak ve $L^* = 0$ olduğunda ise karanlık olarak belirlenir. a^* , yeşil ($-a^*$) ve kırmızı ($+a^*$) arasındaki farkı ve b^* ise sarı ($+b^*$) ve mavi ($-b^*$) arasındaki farkı temsil eder (Sharafudeen, 2012).

Bulanık mantık son yıllarda üzerinde çalışılan esnek modelleme yöntemlerinden birisidir. Klasik mantıkta bir şey ya tümüyle siyahtır ya da tümüyle beyazdır. Bulanık mantığa göre ise bir şey kısmen siyah ve kısmen beyaz olabilir. Zadeh (1965) bulanık mantık kavramında, var veya yok gibi kesin ifadeler yerine değer aralıklarını insan düşüncesine daha yakın olan "çok iyi", "iyi", "orta", "kötü" ve "çok kötü" gibi sözel ifadelerle tanımlayarak, kümeler arası geçişe esneklik kazandırmış ve gerçek yaşamdakine benzetmiştir. Bazı araştırmacılar (Wang ve Raz, 1988; Gülbay ve Kahraman, 2007; Gülbay ve Kahraman, 2008; Shu ve Wu, 2011) bulanık kontrol şemalarının yapımı için bulanık küme teorisini kullanmışlardır. Modern üretim sürecinde bulanık veri mevcut olduğundan, örnek ortalama ve varyansını izlemek için, Shu ve Wu (2011), bulanık kontrol limitleri çözüm sonuçlarına dayalı olarak elde edilen bulanık X ve R kontrol çizelgelerini önermişlerdir. Bulanık baskınlık yaklaşımını kullanarak, bulanık ortalamaları ve varyansları bulanık kontrol limitleri ile karşılaştırarak, üretim sürecinin ayarlanması gerekip gerekmediğini belirleyebilirler (Alizadeh ve Ghomi, 2011).

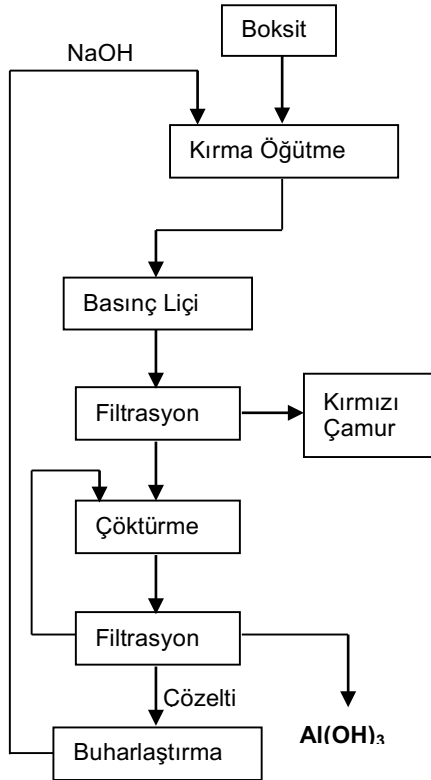
Bulanık kontrol çizelgeleri ve bunların literatürdeki uygulamaları üzerine çalışmış olan Raz ve Wang (1990), Wang ve Raz (1990), Kanagawa ve ark. (1993), Gülbay ve ark. (2004), Gülbay ve Kahraman (2006), Şentürk ve ark. (2011), Shu ve Wu (2011), Aslangiray ve ark. (2014) ve Şentürk (2017) gibi araştırmacılar uygulamalarla bulanık kontrol grafikleri için teorik bir yapı göstermişlerdir. Ayrıca, Kaya ve Kahraman (2011) bulanık kontrol tablolarını oluşturmak için "bulanık kural tabanlı yöntem" üzerinde çalışmışlardır. Yöntemleri, bir sürecin tüm olası kalıplarını tanımlayan bazı kurallara dayanmaktadır. Ayrıca, bulanık X-R kontrol çizelgeleri için önerilen yöntemi simetrik üçgen bulanık sayı kullanarak uygulamışlardır. Khademi ve Amirzadeh (2014), bulanık X-R kontrol çizelgelerine simetrik olmayan bulanık bir sayı kullanarak doğrudan bulanık bir yaklaşım önermişlerdir. Keskin kuralların bulanıklığına dayanan bulanık doğal olmayan desen kurallarını tanımlamışlardır. Uçurum (2017) ise Niğde'de kalsit öğütme tesisine bulanık istatistiksel kalite kontrolü uygulamıştır.

Bu çalışmada, Eti Alüminyum A.Ş. alüminyum üretim tesisinde düzenli olarak ölçülen renk

parametrelerinden elde edilen veriler kullanılmış ve bulanık X-R kontrol çizelgeleri için bir uygulama sunulmuştur. Hesaplanan toplam renk farklılıkları (ΔE) kullanılarak bulanık kontrol tabloları oluşturulmuş ve sürecin kontrol altında olup olmadığı analiz edilmeye çalışılmıştır. Ek olarak, bulanık istatistiksel işlem kontrol çalışmasında kullanılan rastgele seçilmiş bir örnek üzerinde kuru hidratin özellikleri ve hesaplanan beyazlık indeksi (WI) gibi diğer renk parametresi de irdelenmiştir.

1. MATERYAL VE METOT

Eti Alüminyum A.Ş. 1973 yılında kurulmuştur. Alümina, ham alüminyum ve dökme mamul üretimi için faaliyete geçmiştir. 2005 yılında Cengiz Holding tarafından özelleştirme kapsamında Eti Alüminyum A.Ş. satın alınmıştır. Türkiye'nin birincil alüminyum üreticisi olan Eti Alüminyum A.Ş. aynı zamanda cevherin çıkarılmasından nihai ürüne kadar üretim yapabilen dünyanın en büyük entegre tesislerinden biridir. Alüminyum üretiminde kullanılan bayer işleminin akım şeması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Eti Alüminyum A.Ş.'de kullanılan bayer prosesi akım şeması

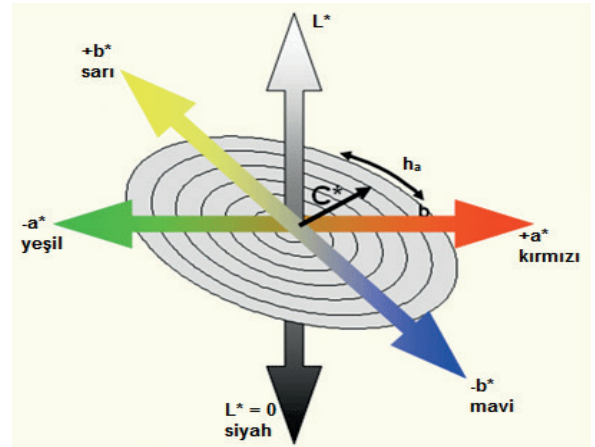
Uluslararası Eclairage Komisyonu (CIE) adlı kuruluş, rengi ölçmek için dünya çapında kullanılan standart değerler belirlemiştir. CIE tarafından kullanılan bu değerler L^* , a^* ve b^* olarak adlandırılmış ve renk ölçüm yöntemi de CIELAB olarak belirlenmiştir. L^* sembolü, parlak ($L=100$ ise "saf beyaz") ve karanlık ($L=0$ ise "siyah") arasındaki renk farkını, a^* sembolü ise, yeşil ($-a$) ve kırmızı ($+a$) arasındaki renk farkını ve b sembolü de mavi ($-b$) ve sarı ($+b$) arasındaki renk farkını temsil eder. CIELAB değerleri, kolorimetrelerin kırmızı yeşil ve mavi filtrelerinden hesaplanır ve özellikle Eşitlik 1-3'e göre beyaz numunelerin tanımlanması için kullanılır:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (1)$$

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \quad (2)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \quad (3)$$

X, Y ve Z, kolorimetrik sistemden kaynaklanan numuneler için tristimülüs değerleri ve X^n , Y^n ve Z^n , nominal beyaz uyarıcı olarak seçilen bir yüzey renginin değerleridir. Silindirik CIELAB renk uzayı sistemi, Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Silindirik CIELAB renk alanı

CIELAB veya CIE (1976)'ya göre L^* , a^* ve b^* değerlerinin algısal bir anlamı vardır: L^* , bir rengin fiziksel yoğunluğu ile ilgili olan parlaklıktır, a^* ve b^* ise kırmızı-yeşil ve sarı-mavi renk eksenlerindeki koordinatlardır. Bu şema, CIELAB uzayında öklid uzaklığı tarafından tanımlanan toplam renk

farklılığı parametresi (ΔE) sabit bir farklılık olacak şekilde tasarlanmıştır (Eşitlik 4);

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (4)$$

Renk alanındaki konum ne olursa olsun, sabit bir "algılanan" renk farkı vermelidir. Birbiriyle temas eden iki renkli parçalar için algılanabilir en küçük fark yaklaşık 0,5-1,0 ΔE birimdir (Christidis ve ark., 2004; Fairchild, 1998).

1.1. Shewhart X-R Kontrol Kartları

Bir üretim sürecinde üretilen her ürünün kalite özelliklerinin değişkenlik göstermesi doğaldır. Kalite ile ilgili işçi, makine ve malzeme gibi özelliklerden kaynaklanan belirlenebilir değişimler daha önemli olup bu etkenlerden kaynaklanan sorunlar olması durumunda proses kontrol dışındadır ve bu değişimlere yol açan etkenlerin tespit edilip düzeltilmesi kalite kontrolün ana amaçlarından biridir. Üretimden belirli ve eşit zaman aralığında alınan örneklerden elde edilen ölçümlerin zamana bağlı değişimlerinin gösterildiği grafiğe kontrol grafiği adı verilir (Bircan ve Özcan, 2003). Proses çıktısı sayısal bir ifade ile ölçülebiliyorsa değişkenler için kontrol kartlarından söz edilebilir. Değişkenler için hazırlanan kontrol kartlarının içinde en fazla kullanılanı X-R kontrol kartlarıdır. Madencilik faaliyetlerinde genellikle kalite verileri ölçülebilir özelliktedir ve bu yüzden X-R kontrol kartlarının kullanımı daha uygundur (Akın, 1996). Bir kontrol grafiği esas olarak üç çizgiden oluşur. Bunlar; alt kontrol limiti (AKL), üst kontrol limiti (ÜKL) ve orta değer (OÇ) çizgisidir. Kalite özelliğinin ortalama değeri aynı zamanda hedeflenen değer olarak da ifade edilen orta çizgi ile temsil edilir. Bu üç temel elemanın hesaplanması için kontrol değişkeni olarak seçilen ve ölçümü yapılarak elde edilen veri tablosundaki veriler alt gruplara bölünürler. Alt grubun numune alma sıklığı ise önceden belirlenir ve saatte bir, vardiyada bir, günde 3 gibi belirli bir değere ayarlanır. Her bir alt grup (m) için ortalama ve değişim aralığı hesaplanır. Bu hesaplamalar için Eşitlik 5'den yararlanılır;

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m}; \quad \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (5)$$

Burada alt grup ortalaması, alt grupların ortalamalarının ortalaması, alt grup değişim aralığı değeri ve değişim aralıklarının ortalamasıdır. Kontrol sınırlarının belirlenmesinde ise Eşitlik 6'den yararlanılır;

$$\begin{aligned} \text{ÜKL}_X &= \bar{X} + \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{R} = \bar{X} + A_2\bar{R}; & \text{OÇ} &= \bar{X}; \\ \text{AKL}_X &= \bar{X} - \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{R} = \bar{X} - A_2\bar{R} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{ÜKL}_R &= \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_4\bar{R}; & \text{OÇ} &= \bar{R}; \\ \text{AKL}_R &= \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_3\bar{R} \end{aligned} \quad (7)$$

Yukarıdaki formüllerde; ÜKL üst kontrol limitini, AKL alt kontrol limitini ve OÇ'de orta çizgiyi ifade etmektedir. Ayrıca; A_2, D_3, D_4 ve d_2 doğal toleranslar olarak tanımlanan sabitler olup, alt ve üst kontrol limitlerinin ve proses yeterlilik indislerinin hesaplanmasında Çizelge 1'de verilen bu sabit değerlerden uygun olanlar kullanılmaktadır (Elevli ve Behdioğlu, 2006; Arslan, 2017).

Çizelge 1. X-R kontrol kartları için katsayılar (Mongomery, 2009)

AGS*(n)	A_2	d_2	D_3	D_4
2	1.880	1.128	0.000	3.267
3	1.023	1.693	0.000	2.574
4	0.729	2.059	0.000	2.282
5	0.577	2.326	0.000	2.114
6	0.483	2.534	0.000	2.004
7	0.419	2.704	0.076	1.924

AGS*: Alt Grup Sayısı

1.2. Üçgen Bulanık Sayılar için Bulanık Mantık X-R Kontrol Kartları

Bir kalite karakteristiğinin "yaklaşık X" olarak tanımlandığını varsayacak olursak, bulanık kümeler kavramı göz önüne alındığında, bu değer üçgen bulanık sayıya (TFN)=(X_a, X_b, X_c) dönüştürülebilir. Bulanık durumda, her örnek veya alt grup üçgen bulanık bir sayıyla (a, b, c) temsil edilir.

Bu çalışmada, her bir gözlem, her bir alt grupta m'nin alt grup sayısı ve n'nin örnek büyüklüğü olan üçgen bir bulanık sayı $\tilde{X}_{ij} = (X_{a_{ij}}, X_{b_{ij}}, X_{c_{ij}})$; $i = 1, 2, 3, \dots, m$; $j = 1, 2, 3, \dots, n$

olarak kabul edilmektedir. Eğer $(X_{a_{i1}}, X_{b_{i1}}, X_{c_{i1}}), \dots, (X_{a_{in}}, X_{b_{in}}, X_{c_{in}})$ alt grup içindeki n bulanık gözlemlerin bir örneği olarak kabul edilirse, o zaman $(\bar{X}_{a_i}, \bar{X}_{b_i}, \bar{X}_{c_i})$ her bir numunenin ortalamasıdır ve Eşitlik 8'e göre hesaplanmaktadır.

$$\bar{X}_{a_i} = \frac{\sum_{j=1}^n X_{a_{ij}}}{n}; \bar{X}_{b_i} = \frac{\sum_{j=1}^n X_{b_{ij}}}{n}; \bar{X}_{c_i} = \frac{\sum_{j=1}^n X_{c_{ij}}}{n} \quad (8)$$

Alt grubun aralığı i ise Eşitlik 9'a göre hesaplanır;

$$\begin{aligned} R_{a_i} &= (\max X_{a_{ij}}) - (\min X_{c_{ij}}); (j = 1, 2, \dots, n) \\ R_{b_i} &= (\max X_{b_{ij}}) - (\min X_{b_{ij}}); \\ R_{c_i} &= (\max X_{c_{ij}}) - (\min X_{a_{ij}}) \end{aligned} \quad (9)$$

Bir bulanık X kontrol kartı çizmek için, önce; hesaplanmalıdır. $\widetilde{O\bar{C}_{\bar{X}}} = (\widetilde{O\bar{C}_a}, \widetilde{O\bar{C}_b}, \widetilde{O\bar{C}_c}), \widetilde{C\bar{L}_{\bar{X}}}$, gözlemlerin bulanık aritmetik ortalamasıdır ve Eşitlik 10'a göre hesaplanır.

$$\begin{aligned} \widetilde{O\bar{C}_{\bar{X}}} &= (\widetilde{O\bar{C}_a}, \widetilde{O\bar{C}_b}, \widetilde{O\bar{C}_c}) = (\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c); \\ \bar{X}_k &= \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_{k_i}}{m}; k = a, b, c \end{aligned} \quad (10)$$

ÜKL_X ve AKL_X'i hesaplamak için; öncelikle bulanık ortalama aralığı $R (R_1, R_2, R_3)$ Eşitlik 11 kullanılır. Daha sonra, bulanık X kontrol limitleri (ÜKL_X ve AKL_X) Eşitlik 12 kullanılır.

$$\bar{R}_k = \frac{\sum_{i=1}^m R_{k_i}}{m}; k = a, b, c \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{ÜKL}_{\bar{X}_{a,b,c}} &= \bar{X}_{a,b,c} + A_2 \bar{R}_{a,b,c} \\ \widetilde{AKL}_{\bar{X}_{a,b,c}} &= \bar{X}_{a,b,c} - A_2 \bar{R}_{a,b,c} \end{aligned} \quad (12)$$

R kartlarının bulanık üst ve alt kontrol limitleri (ÜKL_R ve AKL_R) ise Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanır (Erginel, 2008; Montgomery, 2009; Zabihinpour ve ark., 2014).

$$\widetilde{ÜKL}_R = D_4 \bar{R}_{a,b,c}; \widetilde{AKL}_R = D_3 \bar{R}_{a,b,c} \quad (13)$$

1.3. Bulanık Mantık Proses Yeterlilik İndeksi

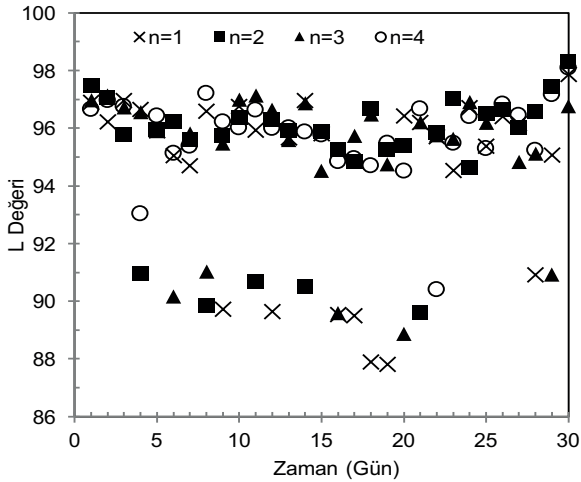
Proses yeterlilik indeksleri (PCIs), bir üretim sürecinin belirtilen sınırlar içinde ürün üretip üretemeyeceğini belirlemek için birçok farklı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Müşteri gereksinimlerini karşılayan bir proses "yeterli" olarak adlandırılır. Proses yeterlilik indeksi (PCI), teknik özelliklere göre bir işlem karakteristiğidir. Bu endeksler, bir prosesin spesifikasyonları ne kadar iyi karşıladığına karar vermeye yardımcı olur. En yaygın kullanılan

proses yeterlilik indisleri C_p, C_{pl} ve C_{pu} 'dur. Burada C_p şartname limitleri ile proses kontrol limitleri arasındaki ilişkiyi, C_{pl} ve C_{pu} ise sırasıyla alt ve üst proses yeterlilik limitlerini göstermektedir (Kotz ve Johnson, 2002; Montgomery, 2009; Kaya ve Kahraman, 2010; Kahraman ve Kaya, 2011). "Yaklaşık" ve "ortalama" gibi değişkenler kullanarak spesifikasyon limitlerini (SL) tanımlamak mümkündür. Üçgen bulanık sayılar (TFN) bu değişkeni bulanık sayılara dönüştürmek için uygundur. Üst ve alt spesifikasyon limitlerinin, sırasıyla, $\widetilde{USL} = TFN(u_1, u_2, u_3)$ ve $\widetilde{ASL} = TFN(l_1, l_2, l_3)$ olarak tanımlandığı bulanık bir işlemdir. Ayrıca bulanık proses ortalaması, standart sapma ve bulanık proses yeterlilik indeksleri Eşitlik 14 kullanılarak hesaplanır;

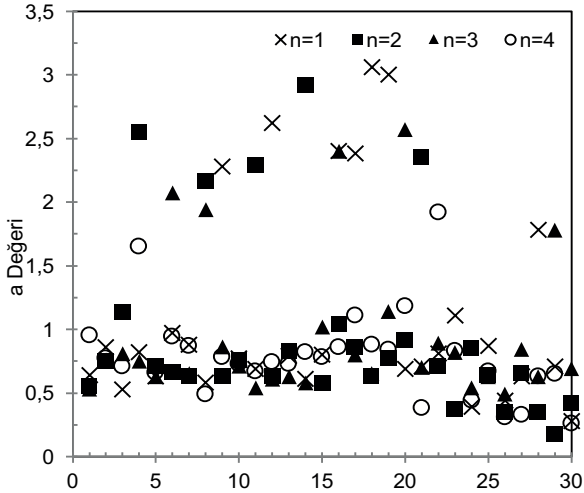
$$\begin{aligned} \tilde{\mu} &= \bar{X} = TFN(\mu_{1,2,3}); \tilde{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = TFN(\sigma_{1,2,3}); \\ \tilde{C}_p &= \frac{\widetilde{USL} - \widetilde{ASL}}{6\tilde{\sigma}} = TFN\left(\frac{u_1 - l_1}{6\sigma_1}, \frac{u_2 - l_2}{6\sigma_2}, \frac{u_3 - l_3}{6\sigma_3}\right); \\ \tilde{C}_{pu} &= \frac{\widetilde{USL} - \tilde{\mu}}{3\tilde{\sigma}} = TFN\left(\frac{u_1 - \mu_1}{3\sigma_1}, \frac{u_2 - \mu_2}{3\sigma_2}, \frac{u_3 - \mu_3}{3\sigma_3}\right); \\ \tilde{C}_{pl} &= \frac{\tilde{\mu} - \widetilde{ASL}}{3\tilde{\sigma}} = TFN\left(\frac{\mu_1 - l_1}{3\sigma_1}, \frac{\mu_2 - l_2}{3\sigma_2}, \frac{\mu_3 - l_3}{3\sigma_3}\right) \end{aligned} \quad (14)$$

SONUÇLAR

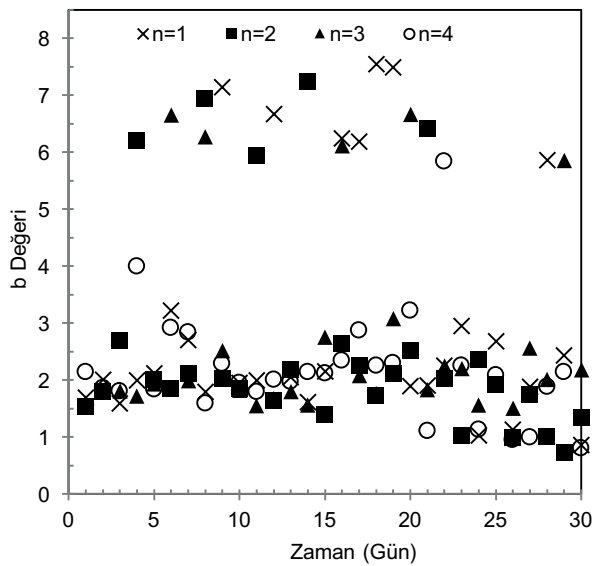
Bu çalışmada, bulanık mantık ile elde edilen veriler kullanılarak proses ortalama ve değişkenliğini izlemek için bulanık X-R kontrol çizelgeleri verilmiştir. Alüminyum üretiminde renk parametreleri çok önemlidir ve alüminyumun beyazlığını etkileyen demirdir. Ürün içeriğindeki demir oranı arttıkça renk pembeye dönmeye başlar, bu da müşteriler tarafından talep edilmeyen bir durumdur. Eti Alüminyum A.Ş. kalite kontrol birimi düzenli olarak bu verilerdeki değişiklikleri izlemekte ve kontrol etmektedir. Bu nedenle, bulanık mantık istatistiksel yöntemlerin kullanılması doğru bir yaklaşım gibi görünmektedir. Ürünün renk kalitesi verilerine dayanan bulanık mantık istatistiksel proses kontrol yöntemleri tesisi izlemeye yönelik standart yaklaşım oluşturmuştur. Kontrol grafikleri ile konsantre cevherin (kuru hidrat) renk parametreleri (L, a ve b) değerlerini analiz etmek için 30 günlük veriler toplanmıştır. Şekil 3-5'te $m=30$ (örnek sayısı) ve $n=4$ (örneklem büyüklüğü) olarak düzenlenmiş veriler verilmiştir. Dörtlü bir örnek büyüklüğüne sahip 30 adet örnek (toplam örnek sayısı $4 \times 30 = 120$), kontrol altında olduğu varsayılan prosesden alınmıştır.



Şekil 3. L değerleri için çalışma verileri



Şekil 4. a değerleri için çalışma verileri



Şekil 5. b değerleri için çalışma verileri

Prosesteki konsantre cevherden (kuru hidrat) alınan veriler kullanılarak hesaplanan toplam renk farklılığı değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Eşitlik 1.10-1.13 kullanılarak, bulanık üçgen kontrol limitleri hesaplanmıştır (Çizelge 3). Her ölçüm numunesi üçgen bulanık sayı şeklinde ifade edilmiştir (X_a , X_b , X_c). Çizelge 4, bulanık üçgen verilerini, Çizelge 5 ise her bir alt grubun bulanık ortalama ve bulanık aralık değerlerini göstermektedir. Bu gözlemler sonucunda elde edilen kontrol limitleri gelecekteki üretimi izlemek için kullanılabilir.

Çizelge 2. Hesaplanmış toplam renk farklılığı (ΔE) değerleri

Örnek	n_1	n_2	n_3	n_4
1	6,135	6,703	6,280	5,619
2	5,399	6,182	6,237	6,066
3	6,280	4,584	5,904	5,946
4	5,740	1,611	5,844	1,698
5	5,146	5,228	5,258	5,698
6	3,736	5,538	2,384	3,996
7	3,857	4,949	5,156	4,233
8	5,867	2,797	1,432	6,473
9	3,035	5,086	4,520	5,233
10	5,851	5,611	6,127	5,305
.
.
.
25	4,342	5,698	5,457	4,738
26	6,209	6,491	6,102	6,652
27	5,468	5,465	4,046	6,354
28	1,363	6,429	4,685	4,849
29	4,329	7,239	1,363	6,084
30	7,458	7,508	5,738	7,674

Çizelge 3. Bulanık üçgen kontrol limitleri

	Konsantre (Kuru Hidrat)		
$\bar{U}SL$	6,730	6,743	6,755
$\bar{A}SL$	4,954	4,959	4,964
$\bar{\mu}$	3,177	3,174	3,172
$\bar{\sigma}$	5,562	5,585	5,608
\bar{C}_{pu}	2,437	2,447	2,457
\bar{C}_{pl}	0	0	0

Çizelge 4. Toplam renk farklılığı (ΔE) değerleri için bulanık üçgen verileri

	X_{a_1}	X_{b_1}	X_{c_1}	X_{a_2}	X_{b_2}	X_{c_2}	X_{a_3}	X_{b_3}	X_{c_3}	X_{a_4}	X_{b_4}	X_{c_4}
1	6,130	6,135	6,140	6,698	6,703	6,708	6,275	6,280	6,285	5,614	5,619	5,624
2	5,394	5,399	5,404	6,177	6,182	6,187	6,232	6,237	6,242	6,061	6,066	6,071
3	6,275	6,280	6,285	4,579	4,584	4,589	5,899	5,904	5,909	5,941	5,946	5,951
4	5,735	5,740	5,745	1,606	1,611	1,616	5,839	5,844	5,849	1,693	1,698	1,703
5	5,141	5,146	5,151	5,223	5,228	5,233	5,253	5,258	5,263	5,693	5,698	5,703
6	3,731	3,736	3,741	5,533	5,538	5,543	2,379	2,384	2,389	3,991	3,996	4,001
7	3,852	3,857	3,862	4,944	4,949	4,954	5,151	5,156	5,161	4,228	4,233	4,238
8	5,862	5,867	5,872	2,792	2,797	2,802	1,427	1,432	1,437	6,468	6,473	6,478
9	3,030	3,035	3,040	5,081	5,086	5,091	4,515	4,520	4,525	5,228	5,233	5,238
10	5,846	5,851	5,856	5,606	5,611	5,616	6,122	6,127	6,132	5,300	5,305	5,310
.
.
.
25	4,337	4,342	4,347	5,693	5,698	5,703	5,452	5,457	5,462	4,733	4,738	4,743
26	6,204	6,209	6,214	6,486	6,491	6,496	6,097	6,102	6,107	6,647	6,652	6,657
27	5,463	5,468	5,473	5,460	5,465	5,470	4,041	4,046	4,051	6,349	6,354	6,359
28	1,358	1,363	1,368	6,424	6,429	6,434	4,680	4,685	4,690	4,844	4,849	4,854
29	4,324	4,329	4,334	7,234	7,239	7,244	1,358	1,363	1,368	6,079	6,084	6,089
30	7,453	7,458	7,463	7,503	7,508	7,513	5,733	5,738	5,743	7,669	7,674	7,679

Çizelge 5. Kontrol sonuçları ile bulanık ortalama ve bulanık aralık değerleri

	\bar{X}_a	\bar{X}_b	\bar{X}_c	Sonuç	R_a	R_b	R_c	Sonuç
1	6,179	6,184	6,189	Kontrol altında	1,074	1,084	1,094	Kontrol altında
2	5,966	5,971	5,976	Kontrol altında	0,828	0,838	0,848	Kontrol altında
3	5,674	5,679	5,684	Kontrol altında	1,686	1,696	1,706	Kontrol altında
4	3,718	3,723	3,728	Kontrol altında	4,223	4,233	4,243	Kontrol altında
5	5,327	5,332	5,337	Kontrol altında	0,542	0,552	0,562	Kontrol altında
6	3,909	3,914	3,919	Kontrol altında	3,144	3,154	3,164	Kontrol altında
7	4,544	4,549	4,554	Kontrol altında	1,289	1,299	1,309	Kontrol altında
8	4,137	4,142	4,147	Kontrol altında	5,031	5,041	5,051	Kontrol altında
9	4,463	4,468	4,473	Kontrol altında	2,188	2,198	2,208	Kontrol altında
10	5,718	5,723	5,728	Kontrol altında	0,812	0,822	0,832	Kontrol altında
.
.
.
25	5,054	5,059	5,064	Kontrol altında	1,346	1,356	1,366	Kontrol altında
26	6,358	6,363	6,368	Kontrol altında	0,540	0,550	0,560	Kontrol altında
27	5,328	5,333	5,338	Kontrol altında	2,298	2,308	2,318	Kontrol altında
28	4,327	4,332	4,337	Kontrol altında	5,056	5,066	5,076	Kontrol altında
29	4,749	4,754	4,759	Kontrol altında	5,866	5,876	5,886	Kontrol dışı
30	7,090	7,095	7,100	Kontrol dışı	1,926	1,936	1,946	Kontrol altında
Ort.	4,954	4,959	4,964		2,437	2,447	2,457	

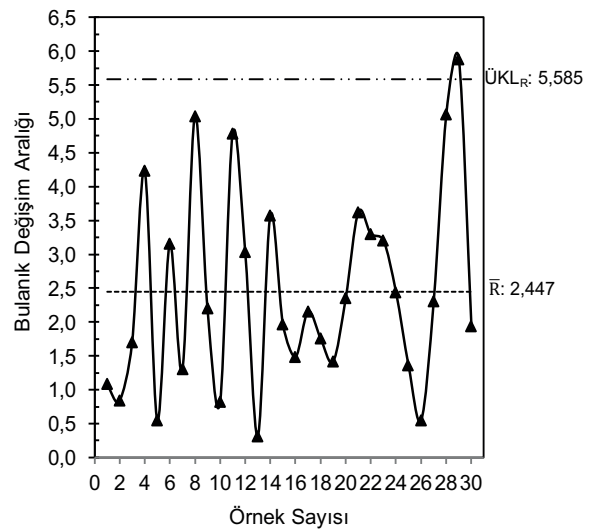
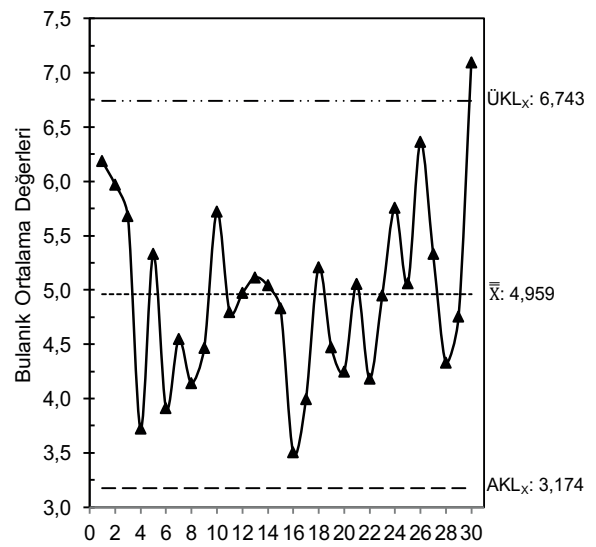
Hesaplama indeksleri için $\widetilde{ÜSL}$ ve \widetilde{ASLTFN} değerleri Eti Alüminyum A.Ş.'nin kalite kontrol biriminden temin edilmiştir. Konsantre cevher (kuru hidrat) için bulanık proses yeterlilik indeksleri (PCIs) belirlenmiştir. Bu indeksler ($\widetilde{\mu}$, $\widetilde{\sigma}$, \widetilde{C}_p , \widetilde{C}_{pu} ve \widetilde{C}_{pl}) ve Eşitlik 1.14 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 6). Daha sonra, tesisin istatistiksel olarak kontrol altında olup olmadığını belirlemek için işlem kontrol edilmiştir. \widetilde{C}_p , \widetilde{C}_{pu} ve \widetilde{C}_{pl} indeksleri sırasıyla 1,267-1,263-1,257; 1,419-1,414-1,408 ve 1,115-1,111-1,106 olarak hesaplanmıştır. Birkaç iterasyon veri toplama işlemi gerçekleştirildikten sonra parametre değerleri 1,00'in üzerinde olduğu görülmüş ve alüminyum üretim tesisinin konsantre cevher üretmek için yeterli olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6. Konsantre cevher için bulanık yeterlilik indeksleri

	Konsantre	(kuru	hidrat)
$\widetilde{ÜSL}$	9,995	10,000	10,005
\widetilde{ASL}	0,995	1,000	1,005
$\widetilde{\mu}$	4,954	4,959	4,964
$\widetilde{\sigma}$	1,184	1,188	1,193
\widetilde{C}_p	1,267	1,263	1,257
\widetilde{C}_{pu}	1,419	1,414	1,408
\widetilde{C}_{pl}	1,115	1,111	1,106

Eti Alüminyum A.Ş.'nin halihazırda kaliteyi izlemek için uyguladığı yöntem alternatif olarak önerilen bulanık ortalama ve değişim aralığı kontrol grafikleri ile Shewhart X-R kontrol grafiklerini karşılaştırmak için, bulanık gözlemlerin ortalama değerine göre Shewhart X-R kontrol kartlarının oluşturulması için net değer hesaplanmıştır (Zabihinpour ve ark., 2014). Bulanık sayıların ortalama ve beklenen değeri hakkında daha fazla bilgi için Carlsson ve Fuller (2001)'e ait makale detaylı olarak incelenebilir. Şekil 6, keskin gözlemler için konsantre cevherin Shewhart bulanık ortalama ve aralık kontrol grafiklerini göstermektedir. Bu ortalama ve rastlantısallıktan kaynaklanan belirsizliğe ek olarak bulanıklıktan kaynaklanan belirsizliği dikkate alan ortalama ve değişim aralığı kontrol grafiklerine göre konsantre cevherde örnek 29 ve 30'un kontrol dışı olduğunu göstermektedir. Bu durum, üretim

tesisindeki konsantre cevherin kalitesini ve aynı zamanda verimliliğini arttırmak için bulanık kontrol kartlarının uygulanmasının gerekliliğini açıkça göstermektedir. Konsantre cevher için örnek 29 ve 30'dan elde edilen verilerin analizi, bu verinin üst kontrol limitinin (ÜKL) üzerinde olduğunu ve azda olsa belirli bir dalgalanmaya neden olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, alüminyum üretim tesisinde konsantre (kuru hidrat) özelliklerinin homojen olmaması olabilir. Genel olarak, test döneminde bu fabrikada ciddi bir sorun olduğu gözlenmemiştir. Ancak tesise beslenen konsantre cevherin tenör değerleri sürekli izlenmelidir.



Şekil 6. Konsantre cevher için bulanık ortalama ve değişim aralığı değerleri

ÖNERİLER VE TARTIŞMA

Eti Alüminyum A.Ş. Seydişehir alüminyum üretim fabrikasının konsantre cevher (kuru hidrat) parametrelerini kullanarak bu tesisinin uygunluğunu kontrol eden bulanık prosesin amaçlandığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

Bu çalışma ile bulanık küme teorisinin geleneksel X-R kontrol çizelgeleri üzerinde uygulanabilir olduğu gösterilmiştir. Bulanık üçgenel gözlemlere dayanarak, kontrol limitlerinin üçgen bulanık sayılar ile bulanık bir ortalama ve değişim aralığı kontrol grafikleri oluşturulmuştur. Proses koşullarını belirlemek için dönüşüm veya bulanıklaştırma teknikleri kullanmak yerine, ÜKL'nin üstünde veya AKL'nin altında kalan örnek ortalamasına dayanan doğrudan bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için ortalama olarak 30 günlük bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Süreç, Shewhart'ın kontrol grafikleri tarafından izlenirse, bu geleneksel kontrol grafikleri, verilerin net değerlere sahip olduğunu varsayar. Ancak, proses her zaman net değildir. Belirsizlik ölçüm sisteminden veya çevresel koşullardan kaynaklanabilir. Böylece bulanık kontrol grafikleri, prosesi izlemek için kaçınılmaz araçlardır. Literatürde, dönüşüm tekniklerini kullanarak prosesi değerlendirmek için bulanık kontrol tabloları kullanılmıştır. Bu durumlarda, kararlar "kontrol altında" veya "kontrol dışı" içerir.

Proses varyasyonları, herhangi bir üretim hattındaki önemli noktalardan biri olan bulanık proses yeterlilik indeksi kullanılarak kontrol edilmelidir. Konsantre cevher (kuru hidrat) ile oluşturulan ortalama ve değişim aralığı kontrol grafiklerinin kontrolde olduğu gözlenmiştir. Ek olarak, 1,267-1,263-1,257 olarak hesaplanan \tilde{C}_p değerleri 1'den daha büyüktür. Bu arada \tilde{C}_{pu} ve değerleri de \tilde{C}_{pl} (sırasıyla 1,419-1,414-1,408; 1,115-1,111-1,106) 1'den daha büyüktür. Bu nedenle sürecin yeterli olduğu söylenebilir.

Bulanık mantık tekniği kullanılarak uygulanan istatistiksel proses kontrol yöntemleri, Eti Alüminyum A.Ş. alüminyum üretim tesisinde oldukça verimli olduğu görülmektedir. Sonuç olarak işletmeye kalite kontrolde bu yöntemin kullanılması önerilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazar, Eti Alüminyum A.Ş.'nin yöneticilerine gerekli veri ve bilgilerin temininde gösterdikleri yardımlardan dolayı içtenlikle teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Akın B., 1996. İşletmelerde İstatistik Proses Kontrol. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, s. 150.
- Aksu, S., 2001. Kırmızı Çamur Bileşenlerinin Hidroklorik Asit Çözeltisindeki Çözünürlükleri, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- Alizadeh, H.M., Ghomi, S.M.T.F., 2011. Fuzzy Development of Mean and Range Control Charts Using Statistical Properties of Different Representative Values. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 22, 253-265.
- Arslan, V., 2017. Bakır Konsantre Tesislerinde Kontrol Kartlarının ve Çok Boyutlu Ölçekleme Analizinin Uygulanması. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 32, 1, 99-103.
- Aslangiray, A., Akyüz, G., 2014. Bulanık Kontrol Grafikleri: Tekstil Firmasında Bir Uygulama. İstanbul Üniversitesi, İşletme Fakültesi Dergisi, 43, 1, 70-89.
- Aydın, B., 2002. AA-2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşleminin İşlenebilirlik Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
- Bayça, S.U., Kısık, H., 2015. Bazik Liç İle Boksit Atığından Alüminyum Hidroksit Ekstraksiyonu. Celal Bayar Üniversitesi, Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 20, 1-12.
- Bircan, H., Özcan, S., 2003. Excel Uygulamalı Kalite Kontrol. Yargı Yayınevi, Ankara, s. 375.
- Burns, R.G., 1993. Mineralogical Applications of Crystal Field Theory. Cambridge Topics in Minerals Physics and Chemistry, 2nd Edition, Cambridge Univ., Cambridge.
- Carlsson, C., Fullér, R., 2001. On Possibilistic Mean Value and Variance of Fuzzy Numbers. Fuzzy Sets and Systems, 122, 315-326.
- Chen, W.F., Lui, E.M., 2005. Handbook of Structural Engineering. CRC Press, New York.
- Christidis, G.E., Sakellariou, N., Repouskou, E.M., 2004. Influence of Organic Matter and Iron Oxides on The Colour Properties of A Micritic Limestone from Kefalonia. Bulletin of The Geological Society of Greece, 36, 72-79.
- Dwight, J., 2002. Aluminum Design and Construction. Taylor and Francis, New York.

- Elevli S., Behdioğlu S., 2006. İstatistiksel Proses Kontrolü Teknikleri İle Kömür Kalitesindeki Değişkenliğin Belirlenmesi. Madencilik Dergisi, 45, 3, 19-26.
- Erginel, N., 2008. Fuzzy Individual and Moving Range Control Charts with α -cuts. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 19, 373-383.
- Fairchild, M.D., 1998. Color Appearance Models. Reading, Mass: Addison Wesley Longman, Inc.
- Gülbay, M., Kahraman, C., 2008. Bulanık Kontrol Diyagramı Modellerinin Geliştirilmesi: Direkt Bulanık Yaklaşım. İTÜ Mühendislik Dergisi, 7, 2, 95-105.
- Gülbay, M., Kahraman, C., 2007. An Alternative Approach to Fuzzy Control Charts: Direct Fuzzy Approach. Information Sciences, 177, 1463-1480.
- Gülbay, M., Kahraman, C., 2006. Development of Fuzzy Process Control Charts and Fuzzy Unnatural Pattern Analyses. Computational Statistics & Data Analysis, 51, 434-451.
- Gülbay, M., Kahraman, C., Ruan, D., 2004. α -Cuts Fuzzy Control Charts for Linguistic Data. International Journal of Intelligent Systems, 19, 1173-1196.
- Günay, D., 2006. Alüminyum Sektörü Hakkında Bir Değerlendirme. Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş., Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Müdürlüğü, GA-06-07-08, s. 50.
- IAI, 2018. International Aluminum Institute, <http://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#map>
- Kahraman, C., Kaya, I., 2011. Fuzzy Estimations of Process Incapability Index. Proceedings of The World Congress on Engineering, London.
- Kanagawa, A., Tamaki, F., Ohta, H., 1993. Control Charts for Process Average and Variability Based on Linguistic Data. International Journal of Production Research, 31, 913-922.
- Kaya, I., Kahraman, C., 2011. Process Capability Analyses Based on Fuzzy Measurements and Fuzzy Control Charts. Expert Systems with Applications, 38, 3172-3184.
- Kaya, I., Kahraman, C., 2010. Development of Fuzzy Process Accuracy Index for Decision Making Problems. Information Sciences, 180, 861-872.
- Khademi, M., Amirzadeh, V., 2014. Fuzzy Rules For Fuzzy X and R Control Charts. Iranian Journal of Fuzzy Systems, 11, 55-66.
- Kissel, J.R., Ferry, R.L., 2002. Aluminum Structures, A Guide To Their Specifications and Design. 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- Kotz, S., Johnson, N., 2002. Process Capability Indices-A Review 1992-2000. Journal of Quality Technology, 34, 2-19.
- Montgomery, D.C., 2009. Statistical Quality Control: A Modern Introduction. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Murray, H., 2002. Industrial Clays Case Study Report of the Mining Minerals and Sustainable Development Project. International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development, 64.
- Raz, T., Wang, J.H., 1990. Probabilistic and Membership Approach in The Construction of Control Charts for Linguistic Data. Production Planning Control, 1, 147-157.
- Sharafudeen, R., 2012. The Manufacturing Process Parameters Affecting Color and Brightness of TiO2 Pigment. International Journal of Industrial Chemistry, 3, 1-7.
- Shu, M.H., Wu, H.C., 2011. Fuzzy X-Bar and R Control Charts: Fuzzy Dominance Approach. Computers & Industrial Engineering, 613, 676-686.
- Şentürk, S., 2017. Construction of Fuzzy C Control Charts Based on Fuzzy Rule Method. Anadolu University Journal of Science and Technology Applied Sciences and Engineering, 18, 563-572.
- Şentürk, S., Erginel, N., Kaya, I., Kahraman, C., 2011. Design of Fuzzy Control Chart. Journal of Multiple Valued-Logic and Soft Computing, 5, 459-473.
- Uçurum, M., 2017. Fuzzy Statistical Process Control of A Calcite Grinding Plant Using Total Color Difference Parameter (ΔE). IOSR Journal of Engineering, 7, 7-22.
- Uslu, E., Çatar, R., Çolak, M., 2017. Si ve Cu Elementlerini İçeren Alüminyum Döküm Alaşımlarının Korozyon Özelliklerinin Belirlenmesi ve Karşılaştırılması. Engineering Sciences, 12, 3, 133-140.
- Wang, J.H., Raz, T., 1990. On The Construction of Control Charts Using Linguistic Variables. The International Journal of Production Research, 28, 477-487.
- Wang, J.H., Raz, T., 1988. Applying Fuzzy Set Theory in The Development of Quality Control Chart. Proceeding of The International of Production Research, 28, 30-35.
- Zabihinpour, S.M., Ariffin, M.K.A., Tang S.H., Azfanizam A.S., 2014. Fuzzy Based Approach for Monitoring The Mean and Range of The Products Quality. Journal of Applied Environmental & Biological Sciences, 4, 1-7.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy Sets, Information and Control. 8, 338-353.



Orijinal Araştırma / Original Research

TRAPEZ KESİTLİ RİJİT ÇELİK TAHKİMATLARDA KULLANILAN ÇELİK PROFİLLERİN YÜKE UYGUN ŞEKİLDE SEÇİMİNİN SONLU ELEMANLAR METODU DESTEKLİ OLARAK İNCELENMESİ

FINITE-ELEMENTS METHOD AIDED EXAMINATION OF THE SELECTION OF STEEL PROFILES IN ACCORDANCE WITH THE ROCK MASS USED IN TRAPEZOIDAL CROSS-SECTIONED ROADWAY SUPPORT

İlter Kilerci^{a*}, Aytaç Başsüllü^{a**}, Burak Önder^{a***}, Onur İpek^{a****}

^a Kocaeli Haddemelik San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezi, İzmir, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 17 Ekim / October 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 06 Nisan / April 2019

Anahtar Sözcükler:

Trapez tahkimat,
Çelik profil,
Sonlu elemanlar metodu,
Analiz.

ÖZ

Bu çalışmada, 5,75 m² galeri kesitine sahip maden galerisinin trapez kesitli rijit çelik tahkimatlarla tasarlanması sürecinde profil kesiti ve profil malzemesi seçiminin sonlu elemanlar metodu destekli olarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Belirtilen hedef doğrultusunda yeraltı açıklığına etkimesi öngörülen yük referans alınarak galeri kesit alanı sabit kalmak şartı ile profil malzemesi ve profil kesiti değiştirilerek yük-profil kesiti optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Referans alınan yeraltı açıklığı için S235 malzemeli NPI 200 kesitli profil kullanımının yerine TH29 kesitli profil kullanımının deplasman ve gerilme dağılımlarına göre daha emniyetli olduğu, TH29 kesitli profil kullanımı ile ayak açıklığının 1500 mm'den 2000 mm seviyelerine kadar artırılarak kurulum maliyetlerinin düşürülebileceği belirlenmiştir.

ABSTRACT

In this study, selection of appropriate profile material and a profile section by using finite elements method during the design studies of the mine roadway support having a cross-section of 5,75 m² was aimed. The support type was trapezoidal sectioned rigid steel support. In parallel with the aim of this study, load-profile section optimization studies were carried out by changing the profile material and profile section while the cross-sectional area of the gallery is kept constant with considering the load acting on the subsurface mine openings. It was determined that using of TH29 profile with 31Mn4 material was safer than NPI200 profile with S235 material, according to the displacement and stress distribution for the subsurface mine openings and the support spacing can be increased from 1500 mm to 2000 mm as a result, the installation costs could be reduced by using TH29 section profile.

Keywords:

Trapezoidal ground support,
Steel profile,
Finite elements method,
Analysis.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: i.kilerci@kocaergroup.com • <https://orcid.org/0000-0003-2314-4966>

** a.bassullu@kocaergroup.com • <https://orcid.org/0000-0002-1929-9781>

*** b.onder@kocaergroup.com • <https://orcid.org/0000-0002-1978-3936>

**** o.ipek@kocaergroup.com • <https://orcid.org/0000-0003-2062-0541>

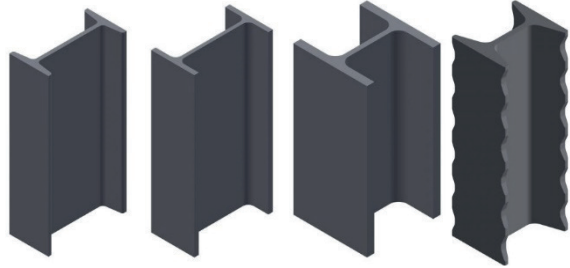
GİRİŞ

Maden çıkarma faaliyetlerinin yürütülebilmesi amacı ile açılan galerilerde, artan yük yoğunluğu ile birlikte açıklıklarda değişimler meydana gelmektedir. Yapay olarak oluşturulan açıklıkların öngörülen servis ömürleri boyunca kararlı bir şekilde kalması, kayaç yükünün taşınmasına yardımcı olarak açıklığın sağlamlaştırılmasına yardımcı olan tahkimat sistemleri sayesinde gerçekleştirilir (Kilerci vd, 2016). Madencilikte tahkimatlar ile sağlamlaştırma işlemleri öncelikle, çalışan personelin güvenliğini yüksek güvenlik katsayılı tasarımlar ile sağlamak için yapılır. Bu işlev sağlandıktan sonra kullanılan tahkimat elemanlarının maliyeti, kullanılan farklı sistemlerin birbirine göre avantajları veya dezavantajlarının ortaya konulması gerekir. Bu aynı zamanda madencilikte çok yüksek mertebelerde olan yatırımın korunması açısından da önemlidir (Mamat, 2014).

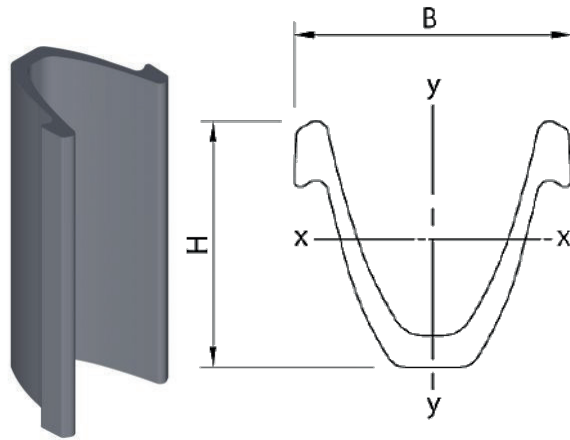
Madencilikte kullanılan tahkimatlar da yapısal sistemlerdir, ancak kayaç yükleri ile sürekli etkileşimleri yük altındaki davranışlarını, kararlılıklarını ve genel yük taşıma kapasitelerini diğer yapısal sistemlerden ayırmaktadır. Genellikle tahkimatlar açıklıktaki kayaçtan daha esneklerdir. Bu esneklik, devam eden galeri açımı sırasında ve sonrasında açıklıkta meydana gelen yük değişimlerinin absorbe edilmesini sağlamaktadır. Yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımında en etkili çözüm yüksek esnekliğe ve tokluğa sahip malzemelerin kullanılmasıdır (Zenti vd 2012). Tahkimat malzemesi olarak çeliğin kullanımının başlaması ile bozuk zemin şartlarında ve artan derinliklerde kazı yapılması mümkün kılınmıştır. NPI, IPE ve H kesite sahip çelik profiller rijit tahkimatlarda kullanılmaya başlanmış olup günümüzde yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımlarında halen geniş bir uygulama alanına sahiptir. Şekil 1’ de tahkimat tasarımında kullanılan belli başlı çelik profiller ve geometri farklılıkları gösterilmiştir (Kocaer Haddecilik).

Rijit çelik tahkimatların sıkışma ve şişme problemi olan zeminlerdeki kazılar sırasında ortaya çıkan konverjansa müsaade ederken tahkimat basıncında azalış göstermesinden dolayı 1932 yılında Freidrich Toussaint ve Egmont Heintzmann tarafından Şekil 2’de gösterilen ve eklem yerlerinden birbiri içinde kayabilen TH profiller

üretimiştir (Podjadtko vd, 2009). Bu sayede daha az malzeme kullanılarak, düğüm noktalarına yükleri dağıtan ve taşıma kapasitesinde verim sağlayan kemerlerin kullanımı çelik tahkimatlar adına önemli bir gelişim sağlamıştır (Kömürlü ve Kesimal, 2013).



Şekil 1. Belli başlı rijit tahkimat profilleri



Şekil 2. Toussaint – Heintzmann profili

TH profillerde kesit uniform olarak daraldığından dolayı yük dağılımı da uniformdur. Yükleme halinde tahkimat geometrisine bağlı olarak kesitte meydana gelen eğilme gerilmesi büyük oranda düşecektir. Yani sistem normal gerilmeye maruz kalacaktır. Bu sayede malzeme kullanımı önemli ölçüde azalış gösterir. Geçme tahkimatlarda kullanılan TH profilin (x-x) ve (y-y) eksenlerine göre mukavemet momentleri incelendiğinde:

$$W_y = 1,09W_x - 3,1 \text{ (cm}^3\text{)}$$

şeklinde bir oran olduğu ve bu oranın 1’e yakınsadığı görülür. I profiller için ise bu oranın

(W_y/W_x) 0,24 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Rankin oranı olarak bilinen bu oran 1'e yaklaştıkça profillerin dayanımı artmaktadır. Dolayısıyla her iki eksendeki mukavemet momentleri birbirine yakın olan TH profilleri; maden tahkimatları açısından kullanımı ideal profillerdir. TH tahkimatlar %15 ile %50 konverjansa izin verdiği için dolayı aktif tabanyolları için uygun bir tahkimat sistemidir (Arioğlu ve Yüksel, 1982).

Son yıllarda ülkemizde meydana gelen kazalar sonucunda yaşanan can kayıplarının artışı, ülkemiz madencilik sektöründeki, tabanyolları ve galerileri meydana getiren çelik tahkimatların optimum özelliklerinin belirlenerek, kayaç yüküne göre uygun tahkimat sistemlerinin seçilmesinin önemini gündeme getirmiştir (Güneş, 2013).

Günümüz teknolojisinin dinamik bir şekilde gelişmesi; madencilik ve tünel inşaat sektöründe kullanılan tahkimat sistemlerinin in-situ testler ile belirlenmesinin tamamlayıcısı olarak sonlu elemanlar temeline dayalı olarak çalışan programlar vasıtası ile modelleme ve simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilebilmesine imkan sağlamaktadır (Kilerci vd, 2016).

Bu çalışmada, Bursa Bölgesi'nde Krom Madenciliği sektöründe faaliyet gösteren kuruluşa ait 5,75 m² galeri kesitine sahip maden galerisinin trapez kesitli rijit çelik tahkimatlarla tasarlanması sürecinde profil kesiti ve profil malzemesi seçiminin sonlu elemanlar metodu destekli olarak gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Belirtilen hedef doğrultusunda yeraltı açıklığına etkimesi öngörülen yük referans alınarak galeri kesit alanı sabit kalmak şartı ile profil malzemesi ve profil kesiti değiştirilerek yük-profil kesiti optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Malzeme

Bu çalışma kapsamında kullanılacak çelik profillere ilişkin mekanik özellikler Çizelge 1'de gösterilmektedir.

Tahkimat yük analizlerinde kullanılacak olan profillere ait kimyasal kompozisyon bilgileri ise Çizelge 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 1. Malzeme mekanik özellikleri (Kocaer Haddecilik)

Profil cinsi	Malzeme cinsi	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
NPI 200	S235JR	235	360
50x50x3 Kutu	S235 JR	235	360
TH29	31Mn4	350	550
C100x6,7	S235JR	235	360

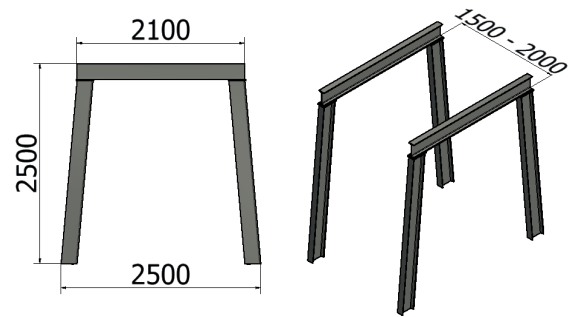
Çizelge 2. Malzeme kimyasal kompozisyonları

Malzeme	%C	%Si	%Mn	%Al
S235JR	0,05	0,1	0,2	0,015 0,08
	0,14		0,8	
31Mn4	0,28	0,2	0,8	0,02
	0,36	0,5	1,1	

1.2. Yöntem

1.2.1. Tasarım Çalışmaları

Çalışmalar kapsamında referans alınan yeraltı açıklığı için tasarlanacak olan tahkimatlara ait ölçüsel özellikler Şekil 3'te gösterilmektedir.



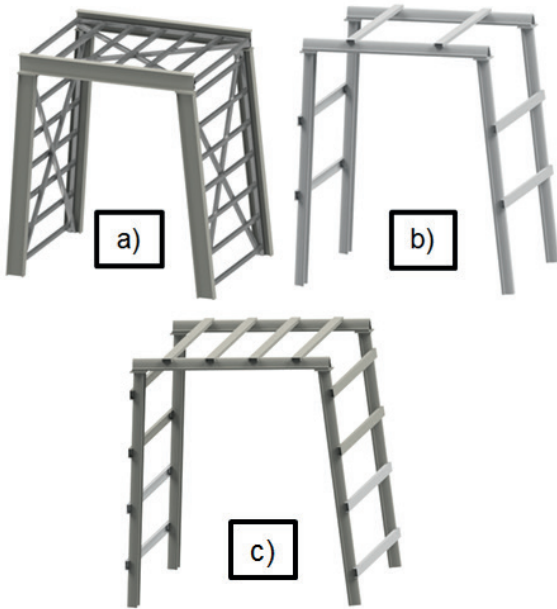
Şekil 3. Referans alınan tahkimat tasarımına ait genel ölçüler

Şekil 3'te genel ölçüleri verilmiş olan tahkimata ait modellemeler kapsamında Autodesk Inventor yazılımı kullanılmış olup, NPI200 ve TH29 profillerden oluşturulması planlanan kemerler kullanılarak katı modellemeler yapılmıştır. Yapılan modelleme çalışmalarına ilişkin detaylar Çizelge 3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3. Tahkimat tasarımlarına ait bilgiler

Tasarım no	Kemer profili	Fırça profili	Galeri açıklığı (mm)
1	NPI 200	50x3 Kutu	1500
2	TH29	C100x6,7	1500
3			2000

Çizelge 3' teki profiller kullanılarak tasarlanan tahkimat sistemlerine ait örnekler Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 4. Tasarlanan tahkimat sistemi örnekleri a) Tasarım 1 b)Tasarım 2 c) Tasarım 3

Tahkimatların tasarımı aşamasında Tasarım 1'de; S235JR malzemeli NPI200 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerler birbirlerine 15 mm kalınlıklı bağlantı plakalarına kaynaklı birleştirme yöntemleri ile birleşecek şekilde bağlanmıştır. 1500 mm ayak açıklığı ile ardışık şekilde yerleştirilen kemerler S235JR malzemeli 50x50x3 mm ölçülerinde kutu profiller kullanılarak bağlanmıştır. Tasarım 2' de 31Mn4 malzemeli TH29 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerler birbirine 15 mm kalınlıklı bağlantı plakaları ile bağlanmıştır. 1500 mm ayak açıklığı ile ardışık şekilde yerleştirilen kemerler S235JR malzemeli C100x6,7 profiller kullanılarak bağlanmıştır. Tasarım 3'de ise 31Mn4 malzemeli TH29 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerler 15mm kalınlıklı bağlantı plakaları ile

bağlanmış, 2000 mm ayak açıklığı oluşturularak ardışık şekilde yerleştirilen kemerler S235JR malzemeli C100x6,7 4'er adet profil kullanılarak bağlanmıştır.

1.2.2. Analiz Çalışmaları

Çalışmanın bu aşamasında, katı modelleme faaliyetleri tamamlanan tasarımların referans alınan kayaç yükünün etki ettiği basınç verisi statik analizlere girdi parametre olarak kullanılmıştır. Tasarlanan sistemin yüklemeler altındaki davranışının doğrulanmasında Sonlu Elemanlar Metodu temeline dayanarak yapısal analiz çözümü gerçekleştirebilen Autodesk Inventor Stress Analysis modülünde sistem düğüm noktaları içeren elemanlara bölünerek, bölünmüş düğüm noktalarının birbirine bağlanması ile mesh yapısı oluşturulmuştur. Örülen bu ağ yapı özelliklerine göre matematiksel denklemler yardımı ile statik yüklemelere maruz bırakılmış ve gerilme – şekil değiştirme sonuçları elde edilmiştir. Analizler kapsamında girdi olarak kullanılan basınç miktarları Çizelge 4'te gösterilmiştir.

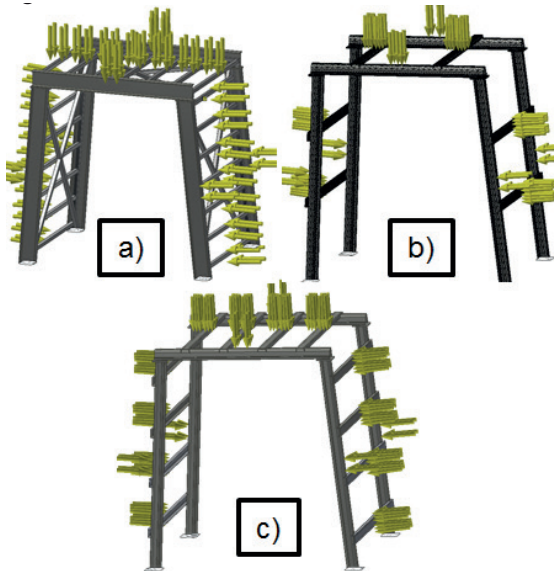
Çizelge 4. Tahkimat sistemine etkiyen yük ve basınç verileri

Tasarım no	Basınç bölgesi	Etkiyen yük (ton)	Basınç değeri (MPa)
1	Yan yüzey	25	0,30
	Üst yüzey	25	0,30
2	Yan yüzey	25	0,51
	Üst yüzey	25	0,54
3	Yan yüzey	33,3	0,32
	Üst yüzey	33,3	0,33

Tasarlanan tahkimat sistemleri için öngörülen kayaç yükü referans alınmış ve tahkimat elemanlarının kayaç yükü ile temas yüzeyleri ile orantılı olarak yayılı yükün etki edeceği şekilde basınç uygulanmıştır. Tahkimat sistemi tasarımlarına uygulanan basınç dağılımları Şekil 5'te gösterilmektedir.

Tahkimat sistemlerini oluşturan tüm elemanlara Autodesk Inventor yazılımının statik analiz paketi

kullanılarak mesh boyutları sabit kalacak şekilde Çizelge 5’de gösterilen adetlerde mesh elemanları atanmıştır. Tüm Sonlu Elemanlar Metodu temelli analizlerde Çizelge 1, Çizelge 3 ve Çizelge 4’deki verilere göre analiz modelleri kurgulanmış ve bu kapsamda statik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Tahkimatlara etkiyen kayaç basıncı

Çizelge 5. Analizlerde atanan mesh eleman sayısı

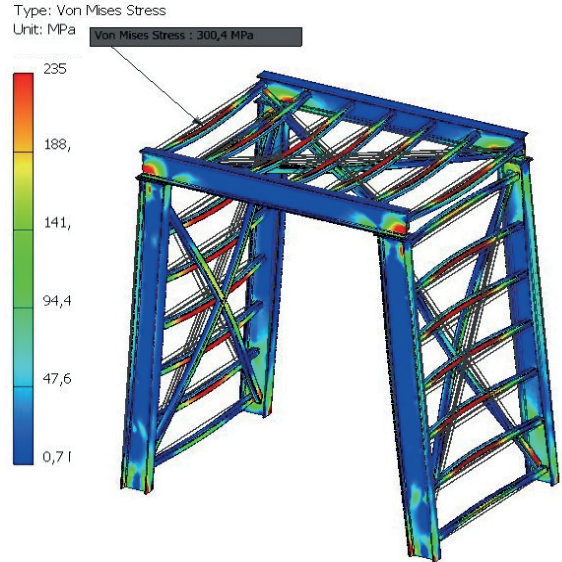
Tasarım no	Mesh eleman sayısı
1	715.998
2	204.851
3	239.017

2. ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

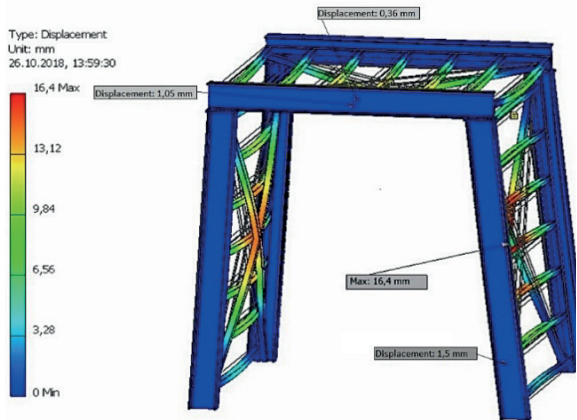
Şekil 3’de gösterilmiş olan referans yeraltı açıklığı boyutlarına göre tasarlanan üç farklı tasarıma ait statik analizler gerçekleştirilmiş olup, tüm analizlere ait çıktılar tasarım numaralarına göre verilmiştir.

2.1. Tasarım 1 Statik Analiz Çıktıları

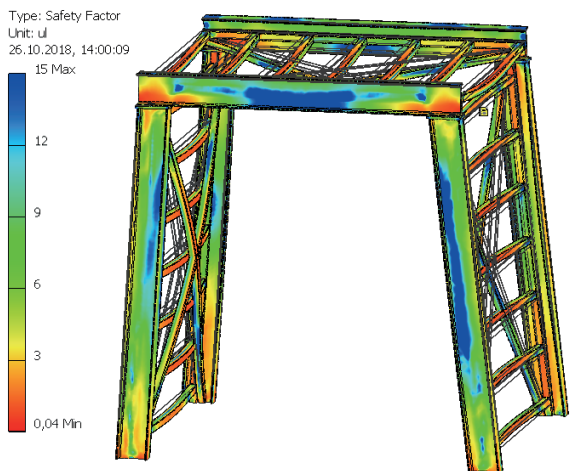
S235JR malzemeli NPI200 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerlerin 1500 mm ayak açıklıkları ile yerleştirilmesi ve S235JR malzemeli 50x50x3 kutu profillerin bağlantı fırçaları olarak kullanılması ile gerçekleştirilen tasarıma üst ve yan yüzeylerinden 25 ton yayılı yük etki edecek şekilde yapılan analizlerin çıktıları Şekil 6 – Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 6. Tasarım 1’ e ait statik analiz sonucu elde edilen gerilme dağılımları



Şekil 7. Tasarım 1’ e ait statik analiz sonucu elde edilen deplasman verileri



Şekil 8. Tasarım 1’ e ait statik analiz sonucu elde edilen güvenlik katsayısı dağılımı

Tasarım 1' e ait analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde; Şekil 6'da gösterilmekte olan tahkimatta maksimum gerilmenin 300 MPa ile üst yüzeyde yer alan bağlantı fırçalarında meydana geldiği belirlenmiştir. Tasarım geneli itibari ile incelendiğinde ise dikey yöndeki basıncın üst kemerlerde bölgesel olarak akmaya maruz kalan bölgelerin meydana geldiği dolayısıyla yükün özellikle üst kemerler tarafından güvenli bir şekilde taşınmayacağı görülmektedir. Üst kemerlerde akma dayanımının üzerinde gerilme meydana gelen bölgelerde kalıcı şekil değişiminin 0,3 ile 1 mm mertebelerinde meydana geldiği Şekil 7'den görülmektedir.

Yan kemerlerin yüzeylerine dik yönde uygulanan basıncın ise yan kemerlerde ortalama 70-100 MPa gerilme meydana getirdiği dolayısıyla yan kemerler tarafından yükün emniyetli bir şekilde taşınabileceği görülmektedir. Belirtilmiş olan bölgelerde elastik şekil değişiminin meydana geldiği ve deplasman miktarının 1,5 mm seviyelerinde meydana geldiği Şekil 7'den görülmektedir.

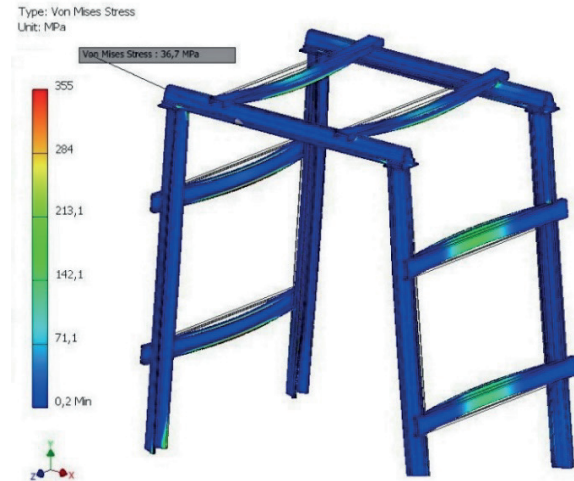
S235JR malzemeli kutu profillerden oluşturulan bağlantı fırçaları incelendiğinde ise düşey ve yanal yönlerde 25 tonluk yayılı yükün meydana getirdiği basınca karşı mukavemetinin yeterli olmadığı, fırçaların tamamında akma bölgesini geçen alanların mevcut olduğundan dolayı fırçaların belirtilmiş olan yükü taşıyamayacağı belirlenmiştir. Şekil 6' da fırçalarda meydana gelen ve akma dayanımını aşan bölgelerde; 7' de gösterildiği üzere deplasman miktarının 16,4 mm değerine ulaştığı ve bu şekil değişiminin kalıcı olduğu görülmektedir.

Tasarım 1'e ait elemanların statik analizi sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları dağılımları incelendiğinde ise Şekil 8' de görüldüğü üzere üst kemerlerde en düşük bölgede 0,5 en yüksek olan bölgede ise 13 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yan kemerlerde güvenlik katsayısının ise ortalama olarak 7,4 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

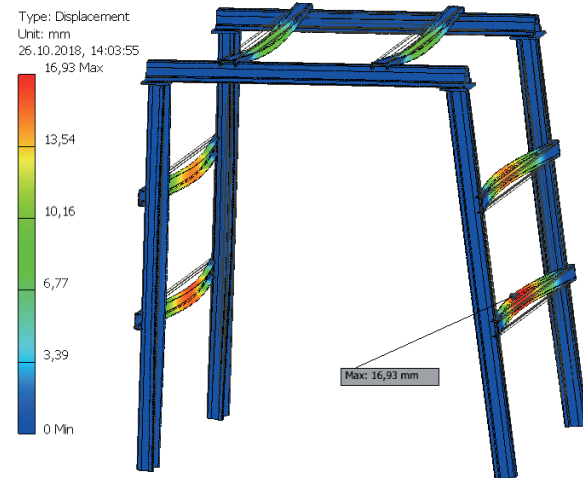
2.2. Tasarım 2 Statik Analiz Çıktıları

31Mn4 malzemeli TH29 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerlerin 1500 mm ayak açıklıkları ile yerleştirilmesi ve S235JR malzemeli

C100x6,7 C profillerin bağlantı fırçaları olarak kullanılması ile gerçekleştirilen tasarıma üst ve yan yüzeylerinden 25 ton yayılı yük etki edecek şekilde yapılan analizlerin çıktıları Şekil 9 – Şekil 11' de gösterilmektedir.



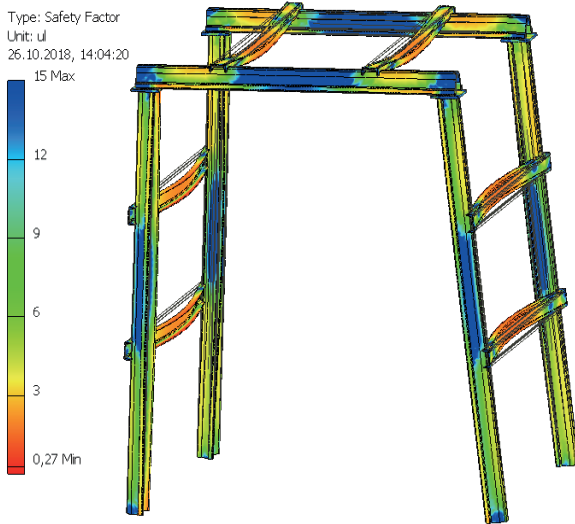
Şekil 9. Tasarım 2' ye ait statik analiz sonucu elde edilen gerilme dağılımları



Şekil 10. Tasarım 2' ye ait statik analiz sonucu elde edilen deplasman verileri

Tasarım 2' ye ait analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde; Şekil 9'da gösterilmekte olan tahkimatta maksimum gerilmenin 164 MPa ile yan yüzeyde yer alan bağlantı fırçalarında meydana geldiği belirlenmiştir. Tasarım geneli itibari ile incelendiğinde yan ve üst kemerlerde en çok 36 MPa seviyelerinde gerilmenin meydana geldiği ve düşey ve yatay yönde etkiyen basıncın kemerler

ve bağlantı fırçaları tarafından güvenli bir şekilde taşınabildiği belirlenmiştir. Üst kemerlerde gerilmenin en yüksek olduğu fırça yüzeylerinde en çok 11,4 mm elastik şekil değişimi meydana geldiği, yan yüzeylerdeki bağlantı fırçalarında ise gerilmenin 164 MPa olduğu bölgedeki deplasman miktarının 16,4 mm olduğu Şekil 10’ da görülmektedir.



Şekil 11. Tasarım 2’ ye ait statik analiz sonucu elde edilen güvenlik katsayısı dağılımı

Yan kemerlerde meydana gerilmelerin 36 MPa değeri ile en yüksek olduğu bölgede meydana gelen deplasmanın 0,53 mm olarak gerçekleştiği dolayısıyla üst ve yan kemerler tarafından 25 tonluk yükün güvenli bir şekilde taşınabileceği görülmektedir.

S235JR malzemeli C100x6,7 profillerden oluşturulan bağlantı fırçaları incelendiğinde ise düşey ve yanal yönlerde 25 tonluk yayılı yükün meydana getirdiği basınca karşı mukavemetinin iki kat emniyetli olduğu ve yükü emniyetli bir şekilde taşıyabileceği belirlenmiştir.

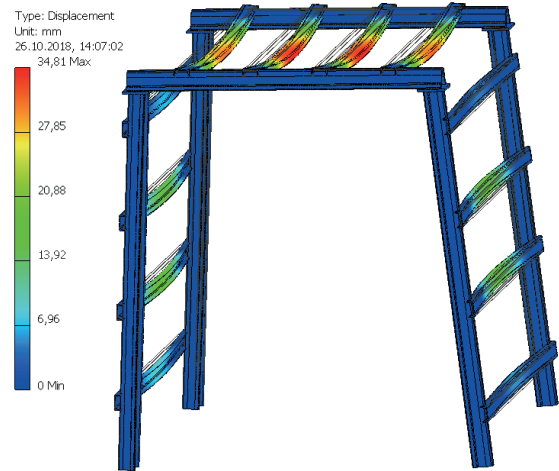
Tasarım 2’ye ait elemanların statik analiz sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları dağılımları incelendiğinde ise Şekil 12’de görüldüğü üzere üst kemerlerde en düşük bölgede 1,5 en yüksek olan bölgede ise 15 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yan kemerlerde güvenlik katsayısının ise en düşük bölgede 5,7 en yüksek ise 15 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

2.3. Tasarım 3 Statik Analiz Çıktıları

Tasarım 2’ ye ait tahkimat sistemi elemanlarının 1500 mm tahkimat açıklığında etki eden düşey ve yanal yöndeki 25 tonluk yükü güvenli bir şekilde taşıyabildiğinden dolayı; bağlantı fırçası sayısı 2 adetten 4 adete çıkarılmış, tahkimat açıklığı ise 2000 mm olarak düzenlenmiştir. Ayak açıklığının 2000 mm’ ye çıkarılmasıyla orantılı olarak ise düşey ve yanal yönlerde tahkimat sistemine etki edecek kuvvet 33,3 ton olarak düzenlenmiş ve bu yayılı yüklerin etki edeceği basıncın büyüklükleri elemanlar üzerine orantılı bir şekilde etki ettirilmiştir.



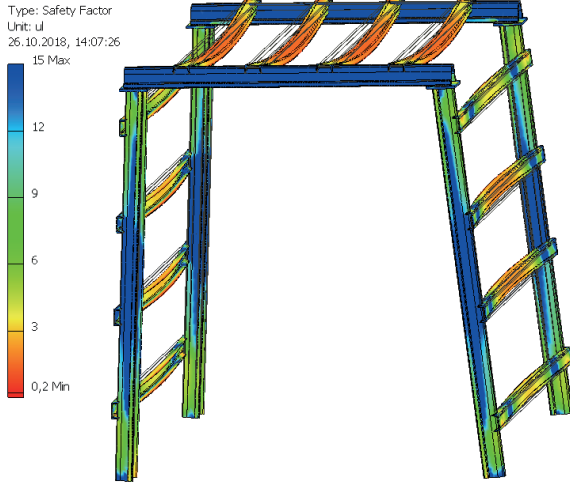
Şekil 12. Tasarım 3’e ait statik analiz sonucu elde edilen gerilme dağılımları



Şekil 13. Tasarım 3’e ait statik analiz sonucu elde edilen deplasman verileri

31Mn4 malzemeli TH29 profillerden oluşturulan yan ve üst kemerlerin 2000 mm ayak açıklıkları ile yerleştirilmesi ve S235JR malzemeli C100x6,7 C

profillerin bağlantı fırçaları olarak kullanılması ile gerçekleştirilen tasarıma üst ve yan yüzeylerinden ayak açıklığıyla orantılı olarak 33,3 ton yayılı yük etki edecek şekilde yapılan analizlerin çıktıları Şekil 12 – Şekil 14’ de gösterilmektedir.



Şekil 14. Tasarım 3' e ait statik analiz sonucu elde edilen güvenlik katsayısı dağılımı

Tasarım 3' e ait analizlerden elde edilen veriler incelendiğinde; Şekil 12' de gösterilmekte olan tahkimatta maksimum gerilmenin 294 MPa ile üst yüzeyde yer alan bağlantı fırçalarında meydana geldiği belirlenmiştir. Tasarım geneli itibari ile incelendiğinde yan ve üst kemerlerde en çok 49 MPa seviyelerinde gerilmenin meydana geldiği ve düşey ve yatay yönde etkiyen basıncın kemerler ve bağlantı fırçaları tarafından güvenli bir şekilde taşınabildiği belirlenmiştir. Üst kemerlerde gerilmenin en yüksek olduğu fırça yüzeylerinde en çok 34,8 mm deplasmanın meydana geldiği, yan yüzeylerdeki bağlantı fırçalarında ise gerilmenin 164 MPa olduğu bölgedeki deplasman miktarının en çok 19,6 mm olduğu Şekil 12 ve Şekil 13' den görülmektedir.

Yan kemerlerde meydana gerilmelerin 49 MPa değeri ile en yüksek olduğu bölgede meydana gelen deplasmanın 1,4 mm olarak gerçekleştiği dolayısıyla üst ve yan kemerler tarafından 33,3 tonluk yükün güvenli bir şekilde taşınabileceği görülmektedir. S235JR malzemeli C100x6,7 profillerden oluşturulan bağlantı fırçaları incelendiğinde ise düşey ve yanal yönlerde 33,3 tonluk yayılı yükün meydana getirdiği basınca

karşı mukavemetinin üst kemerler arasındaki fırçalarda en düşük 1,2 kat, yan kemerlerdeki bağlantı fırçalarında ise en düşük 1,8 kat emniyetli emniyetli olduğu ve yükü emniyetli bir şekilde taşıyabileceği belirlenmiştir.

Tasarım 3'ye ait elemanların statik analizi sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları dağılımları incelendiğinde ise Şekil 14'de görüldüğü üzere üst kemerlerde en düşük bölgede 7,5 en yüksek olan bölgede ise 15 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Yan kemerlerde güvenlik katsayısının ise en düşük bölgede 6,2 en yüksek ise 15 seviyelerinde olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yeraltı açıklığında tahkimata etkiyen yük yoğunluğuna uygun şekilde çelik tahkimat profil kesiti ve malzemesi seçimi kapsamında gerçekleştirilen üç tasarımın 1,5 km uzunluğuna sahip yeraltı açıklığının tahkimat işlerinde kullanılacağı varsayımı yapıldığında elde edilecek ekonomik kazanç değerlendirildiğinde ise aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

Tasarım 1'e ait tahkimat sisteminin kullanılması durumunda belirtilen uzunluktaki açıklığın tahkimi için yaklaşık 560 ton tahkimat elemanı kullanımının gerektiği belirlenmiştir. Tasarım 2' ye ait tahkimat sisteminin kullanılması durumunda belirtilen uzunluktaki açıklığın tahkimi için yaklaşık 400 ton tahkimat elemanı kullanımının gerektiği belirlenmiştir. Tasarım 3' e ait tahkimat sisteminin kullanılması durumunda belirtilen uzunluktaki açıklığın tahkimi için yaklaşık 380 ton tahkimat elemanı kullanımının gerektiği belirlenmiştir. Sonlu Elemanlar Metodu Destekli statik analiz çalışmaları kapsamında 1500 metre uzunluğundaki açıklık için gerekli tahkimat ağırlıkları Çizelge 6' da gösterilmiştir.

S235 malzemeli NPI 200 profilin kg/m birim fiyatından %2 daha pahalı olan 31Mn4 malzemeli TH29 profilli kemerler ile; 50x3 kutu profilin kg/m birim fiyatından %85,7 daha ucuz olan C100x6,7 profillerden oluşturulan fırçaların kullanımı ile tasarlanan tahkimat sistemleri 1500 metre uzunluğundaki referans yer altı açıklığı için yalnızca malzeme maliyetleri bakımından kıyaslanmıştır. 1,5 metre bağ arası açıklığa

sahip Tasarım 1 ile Tasarım 2 kıyaslandığında; 1500 metrelik açıklığın tahkiminde; Tasarım 1'in, Tasarım 2' ye göre %12,03 daha düşük yatırım maliyetine sahip olduğu belirlenmiştir. Fakat TH29 kesitli profilin kesit özelliklerinin yanı sıra mekanik mukavemetlerinin de NPI200 profilden görece yüksek oluşunun avantajı ile TH29 profilli kemerlerden oluşturulan ve bağlar arası 2 metre açıklığa sahip Tasarım 3 ile Tasarım 1 kıyaslandığında ise; referans alınan yer altı açıklığının tahkimi için gerekli yatırım maliyetininin %15,9 oranında düşüceği belirlenmiştir.

Çizelge 6. 1500 metre uzunluğundaki açıklığın tahkimat tasarımlarına ilişkin tahkimat ağırlıkları

Tasarım adı	Tasarım 1	Tasarım 2	Tasarım 3
Tahkimat açıklığı (m)	1,5	1,5	2
Kemer adedi	1001	1001	751
Fırça ağırlığı (ton)	252	66	65
Toplam tahkimat ağırlığı (ton)	304,2	336,7	252,6

31Mn4 malzemeli TH29 profile sahip tahkimat sisteminin kesit özelliklerinin ve mekanik mukavemet değerlerinin S235 malzemeli NPI200 profile sahip tahkimat sisteminin kesit özellikleri ve mekanik mukavemet değerlerinden yüksek oluşu sayesinde bağlar arası açıklığın artırılması ile ilk yatırım maliyetleri yüksek olan madencilik sektörü faaliyetlerinde yatırımın korunması kapsamında malzeme maliyetlerinden avantaj elde edilmesini sağlamıştır. TH tahkimatların işçilik maliyetlerinin de düşürülmesine katkı sağlayarak madencilik yatırımlarının daha efektif yönetilerek maden çıkarma işlerindeki katma değer artırılması katkı sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Yeraltı açıklıklarının tahkimat tasarımında açıklığın yapısı ve kayaç kütesinin belirlenmesi aşamasından sonra tahkimata etkimesi öngörülen yük bilgileri ile tahkimat tasarımında kullanılan yapısal çelik profillerin seçimi; kesit ve malzeme

mekanik özelliklerinin etkilerinin sonlu elemanlar metodu destekli analiz programları sayesinde yük yoğunluğuna uygun şekilde sağlanabilmektedir. Yürütülen tahkimat açıklığı optimizasyon çalışmaları ile madencilik sektörü yatırımlarında ekonomik avantaj kazanılarak işletme süresince katma değer artırılması sağlanabilmektedir.

Özellikle dikey ve yatay eksenlerdeki mukavemet momentlerinin birbirine oranınının 1' e yakınsadığı, madencilik sektörü için tasarlanan TH profiller gibi özel kesitli profillerin ve yüksek kaliteli çeliklerin kullanımı; bu elemanların her iki eksendeki yük taşıma kabiliyetlerinin yüksek oluşu sebebiyle aynı uzunluktaki açıklığın tasarımında tahkimat elemanlarının toplam maliyetlerini düşürdüğü göstermiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma akademik literatürden edinilmiş teorik bilgilerin, akademik literatüre endüstriyel içerikli bilgi olarak geri kazandırılması amacı ile KOCAER Haddecilik Ar-Ge Merkezi tarafından hazırlanmıştır. KOCAER Haddecilik San. ve Tic. A.Ş. Yönetim Kurulu' na makalenin hazırlanmasındaki destekleri için teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Arioğlu E. Yüksel A., 1982. Rijit Galeri Tahkimat Sisteminin Sakıncaları ve Geçme Tahkimat Sisteminin Boyutlandırma Esasları. Türkiye 3. Kömür Kongresi, Zonguldak, 135-153.

Birön C., Arıoğlu E., 1999. Madenlerde Tahkimat İşleri ve Tasarımı. Birsan Yayınevi.

Güneş T., 2013. Madencilikte Taşeron ve Güvencesiz Üretim: İşçi Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları. Türk Tabipleri Birliği, Mesleki Sağlık ve Güvenlik Dergisi, 10-13.

Kilerci İ, Aralar S., Çulha O., 2016. Madencilik ve Tünel İnşa Sektöründe Kullanılan Kaynaklı Tahkimat Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Karşılaştırılması. 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi (ICWET'16).

Kocaer Haddecilik San. ve Tic. A.Ş., Maden ve Tünel (İksa) Profilleri,

http://www.kocaerhadde.com/MediaLibrary/11743/pdf/IKSA_TR_mail.pdf

Kömürlü E., Kesimal A., 2013. Geçmişten Günümüze Tünelcilik ve Tahkimat Malzemeleri. Madencilik, Cilt 52, Sayı 2-3, 33-47.

Mamat H. S., 2014. Metal Madenciliğinde Yeraltı Açıklıklarının Tahkimatı ve Nümerik Yöntemler İle Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi.

Podjadtke R., Witthaus H., Breedlove J., 2009. Development in Steel Roadway Support A Track Record. The 27th International Conference on Ground Control in Mining, Morgantown, West Virginia 2009 Strata Products (USA) Inc., 358-365.

Wang C., Wen Y., Han F., 2012. Analysis on Investment Environment of Mining Industry in China. Procedia Environmental Sciences Volume 12 Part A, 243-251.

Yolcu M., Sağlam N., 2014. Maden İşletmelerinde TMS-TFRS'YE Uygun Finansal Raporlama ve Kapsamlı Uygulama Örnekleri. Detay Yayıncılık, ISBN: 9786055216931.

Zenti L., Lunardi G., Rossi B. ve Gllovich A., 2012. A New Approach in the Design of First Lining Steel Rib. Proceedings of the ITA/AITES World Tunnel Congress on "Tunnelling and Underground Space for a Global Society Bangkok.

ISSN 2564-7024



9 772564 702003