

BİLİMSEL  
**madencilik**  
SCIENTIFIC MINING JOURNAL  
DERGİSİ

ISSN 2564-7024

Cilt / Vol: 57

Sayı / No: 1

Mart / March

2018

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

Xiang Wang  
Qing-Feng Wang  
Okan Su

Orijinal Araştırma / Original Research

**Tool Forces and Specific Energy Prediction Models in the Process of Sandstones Cutting by Using Conical Picks**  
*Kalem Uçlu Keskiyle Kumtaşı Kazısında Keski Kuvvetleri ve Spesifik Enerji Tahmin Modelleri*

Kaan Koçali

Orijinal Araştırma / Original Research

**Açık Ocak Maden İşletmelerinde İşçi Anketleri ile İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürü ve Uygulamasının Araştırılması**  
*Investigation of Occupational Health and Safety Culture and Applications in Open Pit Mines By Using Worker Questionnaires*

Arif Emre Dursun

Orijinal Araştırma / Original Research

**Performance Prediction of Chain Saw Machines Using Schmidt Hammer Hardness**  
*Schmidt Çekici Sertliği Kullanılarak Zincirli Kesme Makinelerinin Performans Tahmini*

Mustafa Ercan  
Selçuk Koltka  
Eyüp Sabah

Orijinal Araştırma / Original Research

**Mermer Artıklarından Öğütülmüş Kalsiyum Karbonat (GCC) Üretimi: Yaş ve Kuru Öğütme Ürünlerinin Karşılaştırılması**  
*The Production of Ground Calcium Carbonate (GCC) From Marble Wastes: Comparison of Wet and Dry Grinding Products*

Olgay Yaralı  
Hamit Aydın  
Utku Sakız  
Haşim Duru  
Servet Bulut

Orijinal Araştırma / Original Research

**Kayaçların Aşındırıcılıklarının Üç Farklı Deney Yöntemiyle Değerlendirilmesi**  
*Determination of Abrasiveness of Rocks With Three Different Test Methods*

Meryem Göktaş

Derleme / Review

**Cevher Hazırlamada Mekanik Aktivasyon Uygulamaları**  
*Mechanical Activation Applications in Mineral Processing*



**TMMOB**  
**MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI**

**BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**  
**Scientific Mining Journal**

Cilt / Vol: 57, Sayı / No: 1, Mart / March, 2018

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

**Baş Editör / 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. İlkyay Bengü Çelik, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

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

Dr. Fırat Atalay, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

**Derginin Kapsamı ve Amacı**

Bilimsel MADENCİLİK Dergisi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın bir yayını olup 1960 yılından bu yana 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. Dergide yeraltı ve açık ocak işletmeciliği, cevher/kömür hazırlama ve zenginleştirme gibi madencilikğin tüm alanlarında yapılan özgün çalışmalar, eleştirel derlemeler, kısa teknik notlar ve dergide yayımlanmış yazılara ilişkin tartışmalar yayımlanır. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizce'dir. Yılda dört kez (Mart, Haziran, Eylül ve Aralık) yayımlanır. Dergiye elektronik ortamda <http://www.madencilik.org.tr> adresinden erişilebilir. Derginin amacı maden mühendisliği mesleğinin ulusal ve uluslararası düzeyde gelişimine katkı sağlamaktır.

**Scope and Aim of the Journal**

*The Scientific MINING Journal, a publication of the Chamber of Mining Engineers of Turkey, has been published since 1960. The name of the journal has been changed from "Mining" to "Scientific Mining Journal" since September 2016 because it can be mixed with popular magazines with similar names and the ISSN number has also been updated from 0024-9416 to 2564-7024. The journal is a medium for the publication of original research papers, critical comprehensive reviews, and technical notes in all fields of mining engineering such as underground and surface mining, and mineral/coal processing. The journal also publishes discussion of papers which have been already published in the journal. The publication languages are Turkish and English, and is published quarterly (March, June, September and December). The journal can also be freely accessed at <http://www.mining.org.tr> The objective is to contribute to the development of the profession of mining engineering at national and international levels.*

**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

Chemical Abstracts

Compendex

ENCOMPLIT

ENCOMPLIT2

GeoRef

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>*

Bilimsel  
**madencilik**  
SCIENTIFIC MINING JOURNAL  
DERGİSİ

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

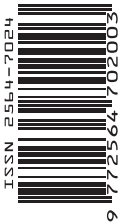
MART  
MARCH  
2018

CİLT  
VOLUME  
57

SAYI  
NUMBER  
1

**İÇİNDEKİLER / CONTENTS**

- |   |    |  |
|---|----|--|
| Xiang Wang<br>Qing-Feng Wang<br>Okan Su                                 | 5  | Orijinal Araştırma / <i>Original Research</i><br><b>Tool Forces and Specific Energy Prediction Models in the Process of Sandstones Cutting by Using Conical Picks</b><br><i>Kalem Uçlu Keskilerle Kumtaşı Kazısında Keski Kuvvetleri ve Spesifik Enerji Tahmin Modelleri</i>                                 |
| Kaan Koçali   | 15 | Orijinal Araştırma / <i>Original Research</i><br><b>Açık Ocak Maden İşletmelerinde İşçi Anketleri ile İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürü ve Uygulamasının Araştırılması</b><br><i>Investigation of Occupational Health and Safety Culture and Applications in Open Pit Mines By Using Worker Questionnaires</i> |
| Arif Emre Dursun  | 25 | Orijinal Araştırma / <i>Original Research</i><br><b>Performance Prediction of Chain Saw Machines Using Schmidt Hammer Hardness</b><br><i>Schmidt Çekici Sertliği Kullanılarak Zincirli Kesme Makinelerinin Performans Tahmini</i>  |
| Mustafa Ercan<br>Selçuk Koltka<br>Eyüp Sabah                            | 35 | Orijinal Araştırma / <i>Original Research</i><br><b>Mermer Artıklarından Öğütülmüş Kalsiyum Karbonat (GCC) Üretimi: Yaş ve Kuru Öğütme Ürünlerinin Karşılaştırılması</b><br><i>The Production of Ground Calcium Carbonate (GCC) From Marble Wastes: Comparison of Wet and Dry Grinding Products</i>          |
| Olgay Yaralı<br>Hamit Aydın<br>Utku Sakız<br>Haşim Duru<br>Servet Bulut | 45 | Orijinal Araştırma / <i>Original Research</i><br><b>Kayaçların Aşındırıcılıklarının Üç Farklı Deney Yöntemiyle Değerlendirilmesi</b><br><i>Determination of Abrasiveness of Rocks With Three Different Test Methods</i>  |
| Meryem Göктаş   | 57 | Derleme / <i>Review</i><br><b>Cevher Hazırlamada Mekanik Aktivasyon Uygulamaları</b><br><i>Mechanical Activation Applications in Mineral Processing</i>  |



**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 manager: Necmi Ergin*

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](mailto:bilgi@madencilik.org.tr) / [info@mining.org.tr](mailto: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: Yorum Matbacılık*

Baskı Tarihi ve saati / *Printing date: 05.3.2018 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*



Orijinal Araştırma / Original Research

## TOOL FORCES AND SPECIFIC ENERGY PREDICTION MODELS IN THE PROCESS OF SANDSTONES CUTTING BY USING CONICAL PICKS

### KALEM UÇLU KESKİLERLE KUMTAŞI KAZISINDA KESKİ KUVVETLERİ VE SPESİFİK ENERJİ TAHMİN MODELLERİ

Xiang Wang<sup>a,b,\*</sup>, Qing-Feng Wang<sup>a,b,\*\*</sup>, Okan Su<sup>c,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, China

<sup>b</sup> China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing, China

<sup>c</sup> Department of Mining and Mineral Extraction, Bulent Ecevit University, Zonguldak, Turkey

Geliş Tarihi / Received : 4 Ağustos / August 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 26 Aralık / December 2017

#### ABSTRACT

**Keywords:**  
Conical pick,  
Rock cutting,  
Tool forces,  
Specific energy,  
Regression analysis.

In this study, unrelieved rock cutting experiments were conducted at the linear rock cutting machine and the characteristics of tool forces were discussed. The correlations among tool forces, specific energy, cutting depth, and rock strength were analyzed using single factor regression analysis method. Based on multiple non-linear regression method, the models of tool forces and specific energy were developed considering the rock strength and cutting depth. The results indicate that models of tool forces have the superior performance. When the model of specific energy is analyzed using the compressive strength of the rock, it was seen that the correlations are weak compared to the model related to tensile strength of rock. In conclusion, it is emphasized that the proposed models presented in this study are particularly recommended for performance prediction of soft and medium-hard strength sandstones in case conical picks are employed.

#### ÖZ

Anahtar Sözcükler:  
Konik keski,  
Kayaç kazısı,  
Keski kuvvetleri,  
Spesifik enerji,  
Regresyon analizi.

Bu çalışmada, doğrusal kesme setinde bağımsız kesme deneyleri yapılmış ve buna göre keski kuvvetlerinin karakteristiği tartışılmıştır. Tek faktörlü regresyon analiz yöntemi kullanılarak keski kuvvetleri, spesifik enerji, kesme derinliği ve kayacın dayanımı arasındaki ilişkiler analiz edilmiştir. Ayrıca, kayacın dayanımı ve kesme derinliği göz önüne alınarak doğrusal olmayan çoklu regresyon yöntemiyle keski kuvvetleri ve spesifik enerji modelleri geliştirilmiştir. Sonuçlar, kesme ve normal kuvvetleriyle ilgili tüm modellerin oldukça üstün olduğunu göstermiştir. Spesifik enerji ile basınç dayanımına bağlı olarak model kurulduğunda ilişki katsayılarının çekme dayanımına göre zayıf olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada sunulan modellerin yumuşak ve orta-sert dayanımdaki kumtaşının kalem uçlu keski kullanılarak kazılması durumunda kullanımının önerilebileceği vurgulanmıştır.

\* [mywayok@163.com](mailto:mywayok@163.com) • <https://orcid.org/0000-0002-6179-6888>

\*\* Corresponding author : [wqf518@aliyun.com](mailto:wqf518@aliyun.com) • <https://orcid.org/0000-0002-9561-9206>

\*\*\* [okansu@beun.edu.tr](mailto:okansu@beun.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0003-1846-6020>

## INTRODUCTION

Tool forces and specific energy are two main topmost concerns of rock cutting. Tool forces, mainly including cutting and normal forces, are basic parameters used for calculating the torque of cutterhead, motor power, and rock cutting efficiency (Bilgin et al. 2012). On the other hand, the specific energy is usually used for assessing rock cuttability and it is one of the most significant parameters used for both the performance assessment and efficiency evaluation of excavation systems (Rostami et al. 1994; Balci et al. 2004; Bilgin et al. 2006; Balci and Bilgin 2007). Cutting experiments not only are performed to study the effects of cutting parameters on the performance of cutting picks, but also they are direct methods to obtain the accurate values of tool forces and specific energy. However, the basic disadvantages are that the costs are very expensive and also experiments take a long time. Thus, theoretical and semi-empirical models (Evans, 1984; Roxborough and Liu, 1995; Goktan, 1997; Goktan and Gunes, 2005; Bao et al., 2011), empirical models (Balci et al., 2004; Bilgin et al., 2006; Tiryaki et al., 2010; Wang et al., 2017) and numerical models (Su and Akcin, 2011; Rojek et al., 2011) are commonly used to predict the tool forces and specific energy values by engineers in this field.

A large and growing body of literature has investigated that both the physical and mechanical properties of the rock and relevant cutting parameters have significant influences on cutting and normal forces (Copur et al., 2003; Balci et al., 2004; Balci and Bilgin, 2007; Tiryaki et al., 2010; Shao et al., 2017).

Evans (1984) theoretically demonstrated that the compressive and tensile strength were dominant properties of the rock influencing the cutting force acting on the conical picks. His cutting model also showed that the cutting forces linearly increase with the square of cutting depth and decrease with the brittleness of the rock. Considering the friction between the pick and rock, Roxborough and Liu (1995) and Goktan (1997) improved Evans' cutting force model. Based on Evans' rock cutting mode, Bilgin et al. (2006) found that the cutting force in unrelieved cutting mode had a strong and statistically linear relationship with the cutting depth. Shao et al. (2017) also reported the similar test results using one type of rock.

On the other hand, specific energy, defined as the work required to break a unit volume of rock, is usually studied based on experimental tests. A considerable amount of literature indicate that the physical and mechanical properties of the rock are the main factors affecting the specific energy of rock cutting. In this context, some prediction models of specific energy have been developed by using single factor regression analysis (Copur et al. 2003; Balci et al. 2004; Bilgin et al. 2006; Tumac et al. 2007, Gunes et al. 2015), regression trees and artificial neural networks (Tiryaki 2009), and adaptive hybrid intelligence techniques (Yurdakul et al. 2014).

The main objective of this study is to investigate the effect of cutting depth on the performance of rock cutting using the conical pick and also develop further empirical models considering the rock strength and cutting depth. To achieve this goal, five different sandstones, which have the uniaxial compressive strength ranging from 17.91 to 85.98 MPa, were subjected to cutting tests at the linear rock cutting rig under different levels of cutting depths in unrelieved cutting modes. As a result of the tests, empirical models of cutting and normal forces and specific energy were developed using the multiple non-linear regression method. The performance of proposed models was also statistically analyzed.

## 1. EXPERIMENTAL STUDIES

### 1.1. Linear Rock Cutting Test

In the scope of the experimental studies, a small scale linear cutting machine (LCM), which can accommodate block samples up to 150 mm x 150 mm x 200 mm, was used (Figure 1).



Figure 1. General view of linear rock cutting machine.

A conical pick is employed in all tests. The main cutting and geometrical parameters on the conical pick are illustrated in Figure 2. The main body of the pick is made of steel while the tip is made of tungsten carbide. The conical pick was mounted on the tool holder, which is fixed directly to the 3-D dynamometer to measure the tool forces acting on the pick. The data acquisition system records the forces and they are processed in MATLAB software. After each cutting, rock pieces were carefully collected from the rock surface and weighed on the scale. Based on the measured forces and collected chip masses, the specific energy of rock cutting was also determined.

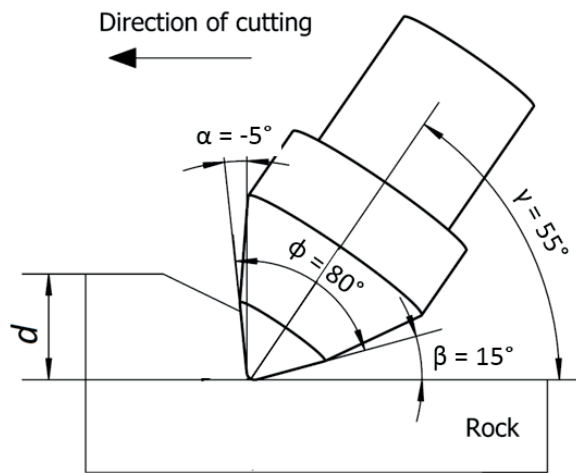


Figure 2. Cutting parameters of conical bit.

In the course of cutting experiments, the attack angle ( $\gamma$ ) was set to be  $55^\circ$ , while the skew and tilt angles were assumed to be  $0^\circ$ . Accordingly, the rake angle ( $\alpha$ ) and the clearance angle ( $\beta$ ) were calculated to be  $-5^\circ$  and  $15^\circ$ , respectively. The cutting depth ( $d$ ) varied from 3 to 18 mm.

### 1.2 Physical and Mechanical Properties of Rocks

Sandstones are widely encountered in underground excavations and they present a wide distribution in terms of strength. Five different sandstones were collected from commercial quarries in Sichuan province and Chongqing city for the cutting tests. (Figure 3).

The physical and mechanical properties of the rocks, including density, the uniaxial compressive strength and the Brazilian tensile strength were determined and the results are listed in Table 1. The uniaxial compressive strength values

of the rock samples varied between 17.91 and 85.98 MPa. The Brazilian tensile strength values changed from 1.64 to 4.97 MPa. The friction angle between the rock and hardened steel was also tested using a special cutter in the LCM.



Figure 3. Sampling locations of sandstones.

Table 1. Physical and mechanical properties of rocks.

Rock name	$\rho$	$\sigma_c$	$\sigma_t$	$\phi$
Sandstone 1	2.22	17.91	1.64	36
Sandstone 2	2.43	79.20	4.97	30
Sandstone 3	2.36	52.99	3.67	42
Sandstone 4	2.35	59.80	3.93	47
Sandstone 5	2.59	85.98	3.69	15

where  $\rho$  is the rock density ( $\text{g/cm}^3$ );  $\sigma_c$  is the uniaxial compressive strength (MPa);  $\sigma_t$  is the tensile strength of the rock (MPa);  $\phi$  is the friction angle between the rock and pick.

### 2. CONSIDERATIONS ABOUT THE TOOL FORCES AND SPECIFIC ENERGY

A number of researchers discussed the effect of cutting speed before and it was reported that cutting speed has not a considerable effect during rock cutting, especially in low speeds (Nishimatsu 1972; Bilgin et al. 2006, 2012; Copur et al. 2017). He and Xu (2015) also analyzed it within the ranges of 4-20 mm/s and found that it is insignificant neither on tool forces nor on specific energy. Therefore, we ignored the effect of cutting speed in our tests and assumed to be 13 mm/s for the entire cutting experiments in unrelieved cutting mode. It has also no influence between adjacent cuts as shown in Figure 4. Each cutting test was replicated at least three times.



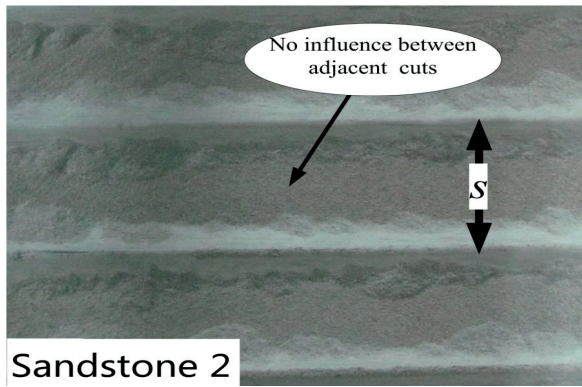
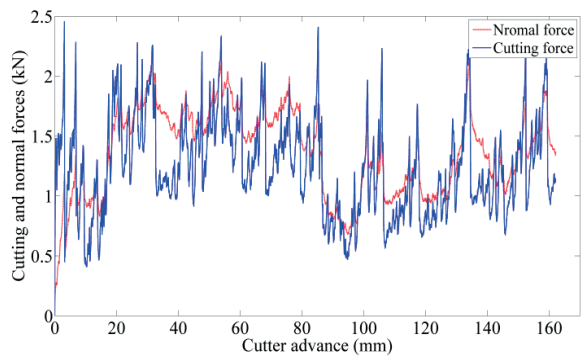


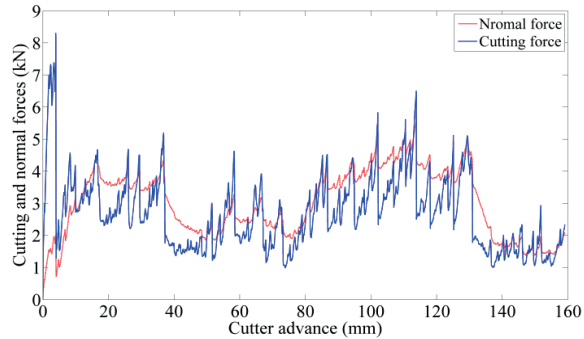
Figure 4. Characteristic of cuts in unrelieved mode.

### 2.1. Effect of Cutting Depth on Tool Forces and Specific Energy

The cutting and normal forces in the cutting depths of 3 and 9 mm are shown in Figure 5. It can be observed in Figure 5a that the cutting and normal forces exhibit some repetitive patterns in that the force increase to a peak value and then drops and increase again. The peak forces are approximately close to each other which means that the biggest chips have more or less the same size.



(a) d=3 mm

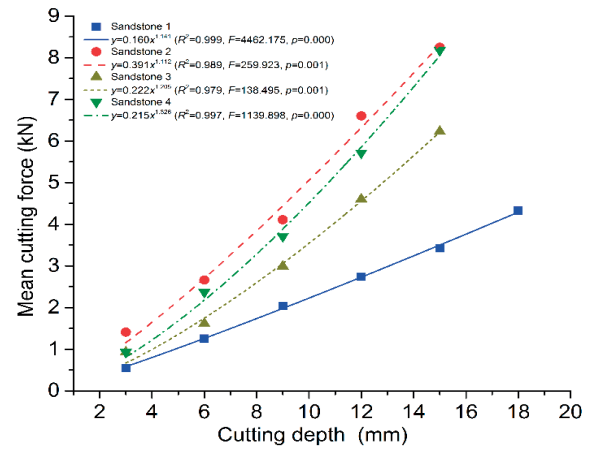


(b) d=9 mm

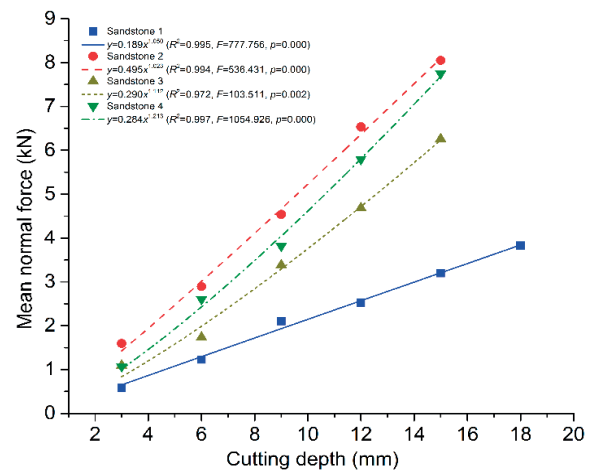
Figure 5. Tool forces at the 3 and 9 mm of cutting depths in unrelieved cutting mode of sandstone 3.

It should be noticed that the distances between the peaks of cutting forces for deep cuts are longer than those for shallow cuts. This indicates that the bigger chips are formed in the process of deeper cutting. On the other hand, it can be seen that the fluctuation intensity of cutting force is much greater than the normal force.

The relationships between mean cutting and normal forces and depths of cut are shown in Figure 6 for sandstones 1~4. It can be seen that there are meaningful relationships as exponential functions between mean tool forces and cutting depth ( $R^2 > 0.97$ ), and the correlations are all statistically valid at the confidence level of 99 percent due to having the  $F$ -values higher than 103 and also  $t$ -values lower than 0.01. The power values of cutting depth in regression equations change between 1.112 and 1.326 for mean cutting force, 1.023-1.213 for mean normal force.



(a)



(b)

Figure 6. Correlations between mean tool forces and cutting depth.

The relationship between the specific energy and cutting depth is shown in Figure 7. It can be seen that the specific energy decreases exponentially with increasing cutting depth. The correlations are also meaningful ( $R^2=0.907-0.972$ ) and are all statistically significant at the confidence level of 99% since  $F$ -values are higher than 38.028 and  $p$ -values are lower than 0.05. The power values of regression equations change between 0.620 and 0.850.

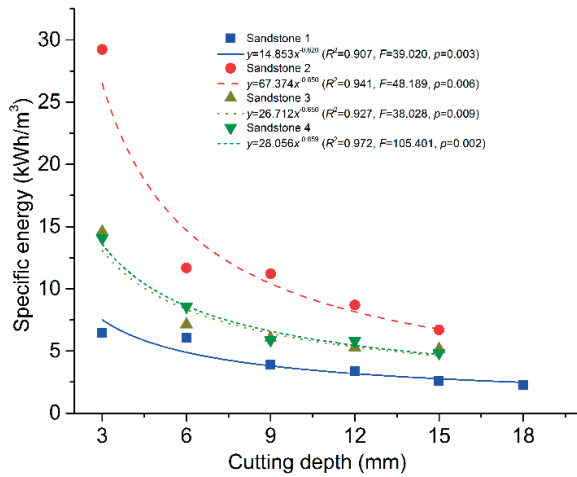


Figure 7. Relationship between specific energy and cutting depth.

### 2.2. Effect of Rock Strength on Tool Forces and Specific Energy

A number of studies have examined that the uniaxial compressive and tensile strengths had significant influence on cutting and normal force and specific energy (Balci et al. 2004; Bilgin et al. 2006, Wang et al. 2017).

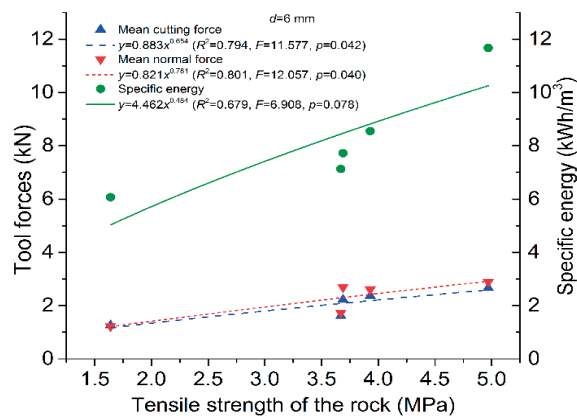


Figure 8. Relationship between tool forces, specific energy and uniaxial compressive strength.

Figures 8-9 designate that there are weak exponential correlations between mean cutting / normal forces and uniaxial compressive / tensile strengths at the cutting depth of 6 mm.

As can be seen from Figures 8-9, the uniaxial compressive and tensile strengths of the rock increased exponentially with increasing the specific energy.

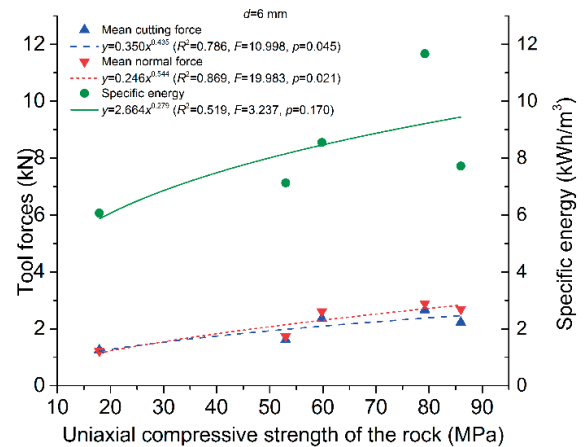


Figure 9. Relationship between tool forces, specific energy and tensile strength of the rock.

## 3. EMPIRICAL PREDICTION MODELS BASED ON MULTIPLE NON-LINEAR REGRESSION METHOD

### 3.1 Development of Models

Previous and present studies indicate that tool (cutting and normal) forces and specific energy are mainly influenced by the rock strength and cutting depth. Therefore, the cutting and normal forces and the specific energy can be expressed in Equation 3.1.

$$\begin{cases} FC(FN) = R_f \sigma_c^{ncf} \sigma_t^{ntf} d^{nf} \\ SE = R_s \sigma_c^{ncs} \sigma_t^{nts} d^{-ns} \end{cases} \quad (3.1)$$

where  $R_f$  and  $R_s$  are the constants  $ncf$ ,  $ntf$ ,  $ncs$ ,  $nts$ ,  $nf$  and  $ns$  are the undetermined coefficients

Based on test data, the undetermined coefficients in Equation 3.1 can be obtained using multiple non-linear regression method. In this context, the Levenberg-Marquardt method was used for solving the models and all regression models were analyzed in SPSS software. The empirical models of cutting force are developed as in

Equations 3.2-3.4. It can be seen that the uniaxial compressive strength of the rock and cutting depth are involved in Equation 3.2, the tensile strength of the rock and cutting depth are involved in Equation 3.3, and the uniaxial compressive and tensile strengths of the rock and cutting depth are included in Equation 3.4. It should also be noted that the statistical relationships are very strong for all regression equations due to having dramatically high determination coefficients values ( $R^2=0.959-0.974$ ).

$$FC_m = 0.019 \sigma_c^{0.551} d^{1.355} \quad (R^2=0.959) \quad (3.2)$$

$$FC_m = 0.075 \sigma_t^{0.797} d^{1.277} \quad (R^2=0.972) \quad (3.3)$$

$$FC_m = 0.049 \sigma_c^{0.164} \sigma_t^{0.582} d^{1.299} \quad (R^2=0.974) \quad (3.4)$$

Furthermore, empirical models of normal force can be developed as given in Equations 3.5-3.7 and it is clear that all regression equations have very strong statistical relationships ( $R^2=0.956-0.978$ ).

$$FN_m = 0.027 \sigma_c^{0.573} d^{1.179} \quad (R^2=0.956) \quad (3.5)$$

$$FN_m = 0.107 \sigma_t^{0.843} d^{1.113} \quad (R^2=0.976) \quad (3.6)$$

$$FN_m = 0.072 \sigma_c^{0.152} \sigma_t^{0.646} d^{1.229} \quad (R^2=0.978) \quad (3.7)$$

Moreover, the models of specific energy can be purposed as presented in Equations 3.8-3.10. The uniaxial compressive strength, the tensile strength of rock, and the cutting depth are taken as independent variables for the non-linear regression analysis. The results specify that the regression equation predicts a decrease in specific energy as the uniaxial compressive strength of the rock increases. This is inconsistent with previous studies although it has a relatively high determination coefficient ( $R^2=0.904$ ). On the other hand, if the ratio of  $\sigma_c/\sigma_t$  is assumed to be the empirical brittleness index, the specific energy models can be rewritten as in Equation 3.10.

$$SE = 4.274 \sigma_c^{0.521} d^{-0.769} \quad (R^2=0.660) \quad (3.8)$$

$$SE = 3.284 \sigma_t^{1.832} d^{-0.821} \quad (R^2=0.870) \quad (3.9)$$

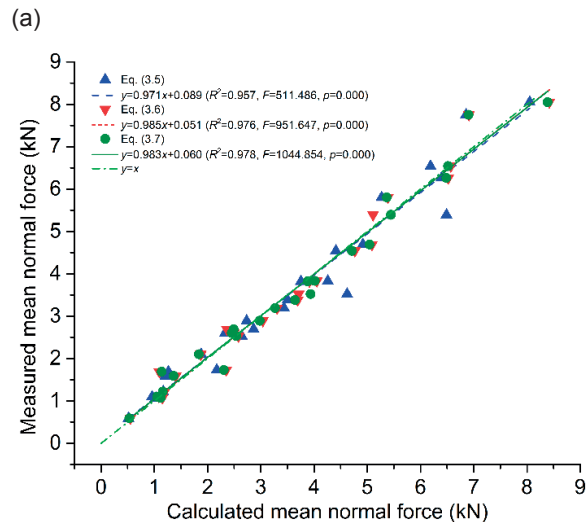
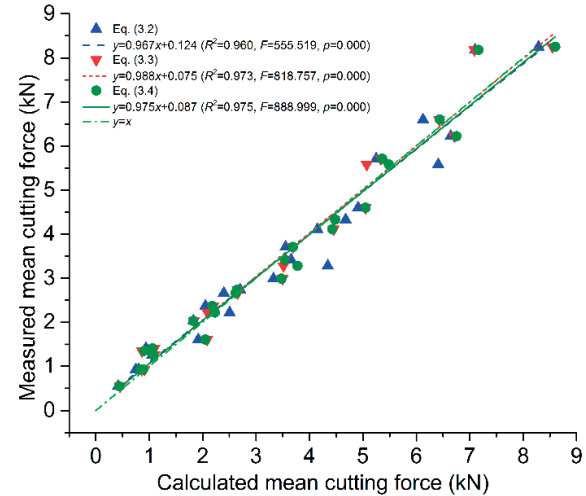
$$SE = 33.332(\sigma_c/\sigma_t)^{-0.764} \sigma_t^{1.705} d^{-0.823} \quad (3.10)$$

According to the equations given above, it is clear that both the tool forces and specific energy have a good agreement with the cutting depth, rock strength and value of empirical brittleness index. However, more data is necessary so as to verify these relationships.

## 3.2. Testing the Empirical Performance of Models

### 3.2.1. Models of Cutting and Normal Forces

Statistical analysis of *t*-test at the confidence level of 95% was performed to check whether the measured forces are significantly different from predicted values. To expand the performance prediction of the cutting and normal forces, relevant regression curves are plotted. From the data and trend lines in Figure 10, it is apparent that the Equations 3.2-3.7 are statistically valid.



(a)  
(b)  
Figure 10. Relationship between measured and calculated mean cutting and force.

As can be seen in Figure 10, on the one hand, data points calculated by Equations 3.2-3.7 are consistently distributed over, above and below the line of  $y=x$  without any outlying data points.

On the other hand, the determination coefficients  $R^2$  are all greater than 0.90, statistically indicating that the models as fitted explains more than 90% of the variability in calculated cutting and normal forces. The correlation coefficients  $r$ , yielded by the cutting and normal forces models, are all also greater than 0.90, which lead to strong relationships between variables. The relationships between calculated and measured cutting and normal forces are all statistically significant at the confidence level of 99% since  $p$ -values are lower than 0.01.

Additionally, the variance account for (VAF) and the root mean square error (RMSE) were calculated by Equation 3.11 and Equation 3.12, respectively. The results of VAF and RMSE of each model are summarized in Table 2.

$$VAF = \left( 1 - \frac{\text{var}(y_i - \hat{y}_i)}{\text{var}(y_i)} \right) \times 100\% \quad (3.11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.12)$$

where  $y_i$  is the measured value,  $\hat{y}_i$  is the calculated value, and  $N$  is the number of samples.

Table 2. The VAF and RMSE values and  $t$ -test results of different prediction models

Model	VAF(%)	RMSE	$t$ -value	$p$ -value
Eq. (3.2)	96.02	0.4414	0.017	0.986
Eq. (3.3)	97.32	0.3634	0.055	0.957
Eq. (3.4)	97.48	0.3509	0.003	0.998
Eq. (3.5)	95.68	0.4344	-0.024	0.981
Eq. (3.6)	97.65	0.3200	-0.005	0.996
Eq. (3.7)	97.85	0.3063	0.002	0.999
Eq. (3.8)	50.88	3.1697	0.045	0.965
Eq. (3.9)	82.20	1.9579	0.274	0.785
Eq. (3.10)	86.57	1.6816	0.181	0.857

The interpretation of VAF and RMSE are: the higher VAF, the better model performs. VAF of 100% means that the measured output has been predicted perfectly. VAF of 0 means that the model performs as poorly as a predictor using simply the mean value of the data (Gunes et al. 2007). The lower RMSE, the better model performs. From the data in Table 2, it is apparent that the VAF values are generally greater than

95.68% while the RMSE values are lower than 0.4414 for cutting and normal forces models. The overall response of these models verify that the empirical models of cutting and normal forces exhibit a good performance.

### 3.2.2 Models of Specific Energy

We also conducted  $t$ -test to statistically analyze the validity of specific energy models. The results of  $t$ -test reveal that there is no significant difference between predicted specific energy given in Equations 3.8-3.10 and the measured ones at the confidence level of 95%. However, the determination coefficient of 0.66 derived from Equation 3.8 resulted in relatively poor performance compared with the Equations 3.9-3.10. The relationships between calculated and measured specific energy are presented in Figure 11.

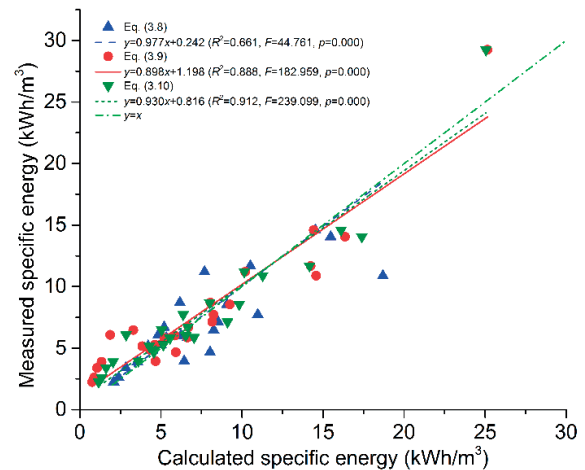


Figure 11. Relationship between measured and calculated specific energy.

It can be seen in Figure 11 that the calculated values by Equations 3.8-3.10 are all evenly distributed around the trend line. However, the determination coefficient of regression equation between measured and calculated specific energy by Equation 3.8 is 0.661, and VAF and RMSE values are 50.88% and 3.1697 respectively, which corresponds to Equation 3.8 has a weak prediction compared to Equations 3.9-3.10. The VAF and RMSE values of Equations 3.9-3.10 are found to be 82.20%, 1.9579; 86.57%, 1.6816, respectively, indicating that Equations 10-11 have good prediction performance. However, the effect of rock brittleness ( $\sigma_c/\sigma_t$ ) on specific energy is uncertain since the ratio of  $\sigma_c/\sigma_t$  used in

regression analysis change from 10.93 to 23.30. Therefore, Equation 3.10 should be carefully used for examining the specific energy when the  $\sigma_c/\sigma_t$  is not in the range.

### 3.3 Comparison of Empirical Models and Theoretical Models of Cutting Forces

Evans (1984) developed a cutting force model for conical picks based on tensile failure as presented in Equation 3.13. Afterwards, Goktan (1997), Roxborough and Liu (1995) modified Evans' (1984) model of conical picks considering the friction between rock and the pick as indicated in Equations 3.14-3.15.

$$FC_E = \frac{16\pi d^2 \sigma_t^2}{\sigma_c \cos^2(\phi/2)} \quad (3.13)$$

$$FC_G = \frac{4\pi d^2 \sigma_t \sin^2(\phi/2 + \varphi)}{\cos(\phi/2 + \varphi)} \quad (3.14)$$

$$FC_{RL} = \frac{16\pi d^2 \sigma_c \sigma_t^2}{[2\sigma_t + (\sigma_c \cos(\phi/2))(1 + \tan(\varphi)/\tan(\phi/2))]^2} \quad (3.15)$$

where  $FC_E$ ,  $FC_G$ ,  $FC_{RL}$  are the peak cutting forces (N),  $\sigma_c$  is the compressive strength of the rock (MPa),  $\sigma_t$  is the tensile strength of the rock (MPa),  $\phi$  is the cone angle of the conical pick;  $\varphi$  is the friction angle between the rock and pick;  $d$  is the cutting depth (mm).

Goktan and Gunes (2005) proposed a semi-empirical cutting force model considering the rake angle as shown in Eq. (3.16).

$$FC_{Gm} = \frac{4\pi \sigma_t d^2 \sin^2[(\pi/2 - \beta)/2 + \varphi]}{\cos[(\pi/2 - \beta)/2 + \varphi]} \quad (3.16)$$

where,  $\beta$  is the rake angle

$$\beta = \pi/2 - (\gamma + \phi/2); \quad \gamma; \text{ is the attack angle.}$$

Based on rock cutting test data, Bilgin et al. (2006) found that there was a strong linear relationship between the ratio of cutting force to cutting depth and the compressive strength of the rock. The regression equation is shown as follows.

$$FC_{Bm} = (8.0948\sigma_c + 213.248)d \quad (3.17)$$

where,  $FC_{Bm}$  is the mean cutting force.

Based on the rock properties given in the Table 1, the cutting force were calculated by Equations 3.13-3.17. The correlations between measured and calculated cutting forces by different models are shown in Figure 12.

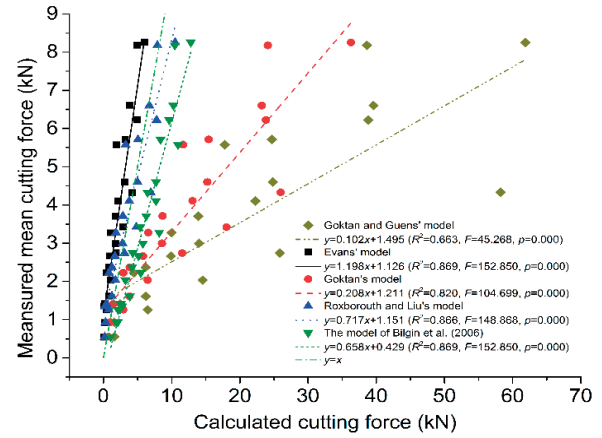


Figure 12. Relationship between measured and calculated mean cutting forces of different models.

It can be seen that there are significantly statistical linear relationships between measured and calculated cutting forces ( $p=0.000$ ). The linear relationships between measured and calculated cutting forces by the models of Evans (1984), Roxborough and Liu (1995), Goktan (1997) and Bilgin et al. (2006) are very strong in terms of their determination coefficients ( $R^2>0.8$ ). However, the linear relationship between measured and calculated cutting force by the model of Goktan and Gunes (2005) is relatively weaker compared to others ( $R^2=0.663$ ). The reason is that the friction angle between the rock and the pick was set to be  $10^\circ$ , which was significantly lower than the measured ones of this study. It can be concluded from the fitting lines and the line of  $y=x$  that the cutting forces calculated using these models are obviously greater than the measured ones.

In order to further investigate whether the measured force values are significantly different from predicted values,  $t$ -test was carried out at the confidence level of 95% as listed in Table 3. What is interesting in this data is that the cutting forces calculated by Roxborough and Liu (1995) model has not a significant difference with the measured forces.

Table 3. *t*-test results of different prediction models.

Model	<i>t</i> -value	<i>p</i> -value
Eq. (3.13)	-2.684	0.010
Eq. (3.14)	3.734	0.001
Eq. (3.15)	-0.317	0.753
Eq. (3.16)	4.462	0.000
Eq. (3.17)	3.131	0.003

It should also be noted that the cutting forces calculated by theoretical models and semi-empirical models are all lower than that of measured ones when the cutting depth is 3 mm. Therefore, the model of Bilgin et al. (2006) is also reliable based on safe considerations.

## CONCLUSIONS

Rock cutting experiments were carried out on five different sandstones under different levels of cutting depths in unrelieved cutting modes. The effects of cutting depth on cutting and normal forces and specific energy were discussed in detail. Some empirical models were developed based on non-linear regression method. The main conclusions can be drawn as follows:

1. Exponential function was found for expressing the relationships between cutting, normal forces, and cutting depth from a statistical perspective.
2. Empirical models of cutting and normal forces were developed considering the uniaxial compressive strength, tensile strength and cutting depth using non-linear regression method. Statistical analysis indicates that all models have good prediction performance. Therefore, engineers can choose the appropriate model to preliminary estimate of the forces according to known parameters.
3. Regression analyses reveal that the empirical model of specific energy with respect to uniaxial compressive strength and cutting depth has a relatively weak performance prediction. However, if the tensile strength of the rock is taken into consideration in the model, the performance of the model represents more reliable results. However, the most surprising correlation is obtained with the ratio of uniaxial compressive to tensile strengths since the model has the best performance compared to the other models.

Additionally, it is reported that the specific energy has a good relationship with the brittleness index ( $\sigma_c/\sigma_t$ ).

4. The *t*-test was carried out to check whether the experimental cutting force are significantly different from the theoretical models. In this context, it was seen that Roxborough and Liu's model provides the best results based on the test data of this study.

It should be noted that the uniaxial compressive strengths of the rock samples used for cutting experiments vary from 17.91 to 85.98 MPa. Therefore, it is emphasized that the models of this study are especially suitable to predict the tool forces and specific energy of the conical picks while cutting from soft to medium-hard strength sandstones.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study is supported by the Open Fund of Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control (Grant No. KFJJ2016032), the Chongqing science and technology innovation leading talent support plan (Grant NO. CSTCCXLJRC201709), which are gratefully acknowledged.

## REFERENCES

- 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, 468-476.
- Balci, C., Demircin, M.A., Copur, H., Tuncdemir, H., 2004. Estimation of Optimum Specific Energy Based on Rock Properties for Assessment of Roadheader Performance. *J S Afr Inst Min Metall*, 104 (11), 633-642.
- Bao, R.H., Zhang, L.C., Yao, Q.Y., Lunn, J., 2011. Estimating the Peak Indentation Force of the Edge Chipping of Rocks Using Single Point-Attack Pick. *Rock Mech Rock Eng*, 44, 339-347.
- Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2012. Effect of Replacing Disc Cutters With Chisel Tools on Performance of a TBM in Difficult Ground Conditions. *Tunn Undergr Space Technol*, 27, 41-51.
- Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., Akcin, N., 2006. Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical

- Picks and the Comparison of Some Experimental and Theoretical Results. *Int J Rock Mech Min Sci*, 43, 139-156.
- Copur, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D. Avunduk, E., 2017. Effects of Different Cutting Patterns and Experimental Conditions on the Performance of a Conical Drag Tool. *Rock Mech Rock Eng*, DOI 10.1007/S00603-017-1172-8.
- Evans, I., 1984. A Theory of the Cutting Force for Point-Attack. *Int J Min Eng*, 2, 63-71.
- Goktan, R.M., 1997. A Suggested Improvement on Evans Cutting Theory for Conical Picks. *Proce. of the Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Brisbane, Queensland, Vol. I. P. A4~57-61.*
- Goktan, R.M., Gunes, N., 2005. A Semi-Empirical Approach to Cutting Force Prediction for Point Attack Picks. *J S Afr Inst Min Metall*, 105, 257-263.
- Gunes, N., Yurdakul, M., Goktan, R.M., 2007. Prediction of Radial Bit Cutting Force in High-Strength Rocks Using Multiple Linear Regression Analysis. *Int J Rock Mech Min Sci*, 44, 962-970.
- Gunes N., Tumac D., Goktan R.m. 2015. Rock Cuttability Assessment Using the Concept of Hybrid Dynamic Hardness (HDH). *Bulletin of Eng Geo and the Env*, 74(4):1-12.
- He, X., Xu, C., 2016. Specific Energy as An Index to Identify the Critical Failure Mode Transition Depth of Rock Cutting. *Rock Mech Rock Eng*, 49 (4), 1461-1478.
- Nishimatsu, Y. 1972. The Mechanics of the Rock Cutting. *Int J Rock Mech Min Sci*, 9: 261-270.
- Rojek, J., Oñate, E., Labra, C., Kargl, H., 2011. Discrete Element Simulation of Rock Cutting. *Int J Rock Mech Min Sci*, 48, 996-1010.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D.M., 1994. Performance Prediction: A Key Issue In Mechanical Hard Rock Mining. *Min Eng*, 46 (11), 1264-1267.
- Roxborough, F.F., Liu, Z.C., 1995. Theoretical Considerations On Pick Shape In Rock and Coal Cutting. *Proc of the Sixth Underground Operator's Conference, Kalgoorlie, WA, Australia, P. 189-193.*
- Shao, W., Li, X.S., Sun, Y., Huang, H., 2017. Parametric Study of Rock Cutting With SMART\* CUT Picks. *Tunn Undergr Space Technol*, 62, 134-144.
- Su, O., Akcin, N.A., 2011. Numerical Simulation of Rock Cutting Using the Discrete Element Method. *Int J Rock Mech Min Sci*, 48, 434-442.
- Tiryaki, B., 2009. Estimating Rock Cuttability Using Regression Trees and Artificial Neural Networks. *Rock Mech Rock Eng*, 42(6), 939-946.
- Tiryaki, B., Boland, J.n., Li, X.s., 2010. Empirical Models to Predict Mean Cutting Forces on Point-Attack Pick Cutters. *Int J Rock Mech Min Sci*, 47, 858-864.
- Tumac, D., Bilgin, N., Feridunoglu, C., Ergin, H., 2007. Estimation of Rock Cuttability from Shore Hardness and Compressive Strength Properties. *Rock Mech Rock Eng*, 40 (5), 477-490.
- Wang, X., Liang, Y.P., Wang, Q.F., Zhang, Z.Y., 2017. Empirical Models for Tool Forces Prediction of Drag-Typed Picks Based on Principal Component Regression and Ridge Regression Methods. *Tunn Undergr Space Technol*, 62, 75-95.
- Yurdakul, M., Gopalakrishnan, K., Akdas, H., 2014. Prediction of Specific Cutting Energy in Natural Stone Cutting Processes Using the Neuro-Fuzzy Methodology. *Int J Rock Mech Min Sci*, 67, 127-135.



Orijinal Araştırma / Original Research

## AÇIK OCAK MADEN İŞLETMELERİNDE İŞÇİ ANKETLERİ İLE İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ KÜLTÜRÜ VE UYGULAMASININ ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY CULTURE AND APPLICATIONS IN OPET PIT MINES BY USING WORKER QUESTIONNAIRES

Kaan Koçali <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Yüksek Maden Mühendisi, İstanbul Aydın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Sağlığı ve Güvenliği Doktora Programı, İSTANBUL

**Geliş Tarihi / Received** : 6 Ekim / October 2017  
**Kabul Tarihi / Accepted** : 20 Aralık / December 2017

**Keywords:**  
 Madenlerde  
 iş sağlığı ve güvenliği,  
 Maden iş sağlığı ve  
 güvenliği kültürü

**Anahtar Sözcükler:**  
 Occupational health and  
 safety in mines,  
 Mining occupational health and  
 safety culture.

### ÖZ

Türkiye'nin çeşitli illerindeki açık ocak maden işletmelerinde çalışan işçilere, maden işletmelerinde alınması gereken asgari iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin varlığı sorulmuştur. Bunun için bazı anketler hazırlanmış ve işçinin sadece kendi işi için değil tüm maden sahası ve işletmesi için fikir sahibi olup olmadığı ölçülmüştür. Hazırlanan soruları arttırmak tabii ki mümkündür fakat en basit haliyle iş sağlığı ve güvenliği kültürünün araştırılması planladığı için soruların detay ayrıntıları ankete konulmamıştır. Ankette sorulan sorular başlıklar haline ayrılarak işçilere sunulmuştur. Böylece işçinin farklı alanlardaki önlemler hakkında kendisini de ilgilendiren sorunları görmesi sağlanmıştır. Kısacası işçilerin en basit haliyle kendi çalıştıkları maden ocaklarında Risk Analizi ve Değerlendirmesi yapmaları sağlanmıştır. Böylece hem maden ocağı hem de işçinin İş Sağlığı ve Güvenliği Kültürü'nü ne kadar bildiği ve uyguladığı araştırılmıştır.

### ABSTRACT

The existence of minimum occupational health and safety measures that have been taken in mining companies has been asked to workers in open pit mining operation in various provinces of Turkey. Some questionnaires have been prepared for this and they have been measured whether the workers have an idea for the entire minefield and the operation, not just for their own works. It is of course possible to increase the number of questions but the details of the questions were not surveyed because it plans to search for occupational health and safety culture in the simplest way. The questions asked in the survey were divided into headings and presented to the workers. This allows the worker to see the problems that concern him about the measures in different areas. In short it provides that the workers have done Risk Analysis and Assessment in their mines. Thus, it has been researched how much the miner and the worker know and apply the culture of Occupational Health and Safety.

\* Sorumlu yazar: [kaankocali@gmail.com](mailto:kaankocali@gmail.com) • <http://orcid.org/0000-0002-1329-6176>



## GİRİŞ

Madencilik, tarih boyunca toplumları ve uygarlıkları şekillendiren en temel sektörlerden biri olmuştur. Özellikle, sanayi devriminden sonraki son iki yüz yılda kömürün ve demirin önemi çok fazla artmıştır. İçinde bulunduğumuz yüzyılda da, madencilik faaliyetleri olmaksızın insan yaşamının sürdürülebilmesi ve gelişmesi mümkün değildir. Kullandığımız arabalardan, yaşadığımız evlere, bilgisayarlardan telefonlara kadar yaşamımız için vazgeçilmez olan hemen hemen her şey, madencilik sonucu elde edilen ürünler sayesinde yapılmıştır (Atak, 2010).

Madenciliğin gelişim sürecini dört ana başlıkta toplamak mümkündür:

- İşletilen ve kullanılan maden sayısında giderek çeşitlenme ve artış,
- Madenlere olan talebin hızla artması ile üretimin artması,
- Arama, işletme ve cevher hazırlama yöntemlerinin gelişmesi ve çeşitlenmesi,
- Başlangıçta insan emeği ile üretilen madenlerde mekanizasyonun artması ve işgücü kullanımının azalması (Koçali, 2016).

Madencilik yüksek oranda istihdam sağlama özelliğine sahip olması ve enerji sektörümüz başta olmak üzere ekonomimize büyük oradan katma değer sağlaması açısından vazgeçilmez sektörlerimizden biridir. Ancak maden işletmelerinin yapıları itibarıyla birçok tehlikeli risk içerlerinde barındırmaktadır. Özellikle ülkemizde son 30 yılda madenlerde meydana gelen kazalarda binin üstünde madenci hayatını kaybetmiş, meslek hastalıklarından ölenlerin sayısı ise her geçen gün artmaktadır. Kayıpların önüne geçmek için iş kazalarını önlemek, kaza öncesi ve sonrası gerekli önlemleri almak madencilik endüstrisi için olmazsa olmaz bir gerekliliktir (Fazlıoğlu, 2017)

## 1. MADENCİLİK FAALİYETLERİNDE ALINMASI GEREKEN İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ÖNLEMLERİ

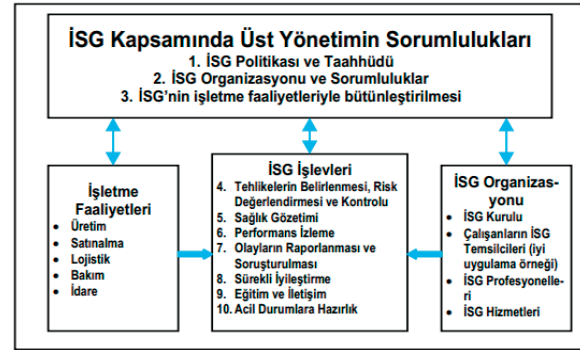
Ulusal standartların büyük bir çoğunluğu, İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ile ilgili Dünya Çalışma Örgütü (ILO) Rehberleri (ILO, 2001) ve bunun yanı sıra OHSAS 18001 standardı 5 ana konu başlığından oluşmuştur:

- Politika
- Planlama

- Uygulama ve İşletim
- Kontrol ve Düzeltici Faaliyet
- Yönetimin Gözden Geçirilmesi

İş sağlığı ve güvenliği sistemlerinde yukarıda belirtilen 5 adım genişletilmiştir. Özellikle 10 adıma vurgu yapılırken farklı organizasyon birimlerini tanımlanmıştır. "İSG Organizasyonu" kapsamında hem işlevler hem de işletme sahibi ve yöneticiler, genel müdürler, bölüm müdürleri ve amirler gibi İş Sağlığı ve Güvenliği sorumlulukları olan kişiler bulunmaktadır. "İSG Organizasyonu", mevzuatın getirdiği İş Sağlığı ve Güvenliği ile ilgili yükümlülüklerin yerine getirilmesine yönelik faaliyetleri yürüten işletme içi veya işletme dışı profesyoneller ve hizmet birimlerini ifade etmektedir (Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2012)

Şekil 1'de iş sağlığı ve güvenliği kapsamında yapılması gereken faaliyet ve organizasyonları gösterilmiştir.



Şekil 1. İSG yönetimi ve on adımı

Madenlerde İş Sağlığı ve Güvenliği önlemleri 7 farklı kanun ve yönetmelik çerçevesinde alınır (Koçali, 2016):

- İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu
- İş Kanunu
- Borçlar Kanunu,
- Sosyal Sigortalar Kanunu
- Umumi Hıfzıssıhha Kanunu
- Maden Kanunu
- Maden İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği

Tüm bu kanun ve yönetmelikler çerçevesinde bir maden işletmesinde alınması gereken asgari önlemleri aşağıda sıralanmaktadır (Koçali, 2016):

### 1.1. Sorumlu Personel

Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmelerinde Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği'nin Yeraltı ve Yerüstü Maden İşletmeleri İle Bunların Yerüstü Tesislerinde Uygulanacak Asgari Genel Hükümler bölümünde "Tüm maden işyerinde işveren tarafından atanmış, işçiler çalıştığı sürece görev yapacak, yeterli beceri ve uzmanlığa sahip sorumlu bir kişi bulunması zorunludur". ibaresi bulunmaktadır.

Bu kişiler aşağıdaki ünvanlara sahip olabilirler (Erdim, 2015):

- Sorumlu Müdür
- Daimi Nezaretçi
- İş Güvenliği Uzmanı
- Teknik Eleman / Kalifiye İşçi

### 1.2. İş Talimatları

Her maden işyeri için işçilerin sağlık ve güvenliklerinin korunması ve iş ekipmanlarının güvenli bir şekilde kullanılması için gerekli kuralları belirleyen yazılı talimatlar hazırlanacaktır. Tüm güvenlik talimatları işçilerin anlayacağı şekilde basit ve açık olacaktır (Erdim, 2015).

Bu talimatlar, acil durum ekipmanlarının kullanımına ve işyerinde veya işyeri yakınındaki herhangi bir acil durumda nasıl hareket edileceğine ilişkin bilgileri de içerecektir (Koçali, 2016).

### 1.3. Yer Seçimi

Açık işletmelerde iş güvenliği öncelikle yer seçimi ile başlar. Yer seçiminde;

- Elektrik ve telefon şebekesine olan yakınlık,
- Kara ve deniz ulaşımına elverişlilik,
- Sel ve su baskınlarına karşı korunma,
- Ocak içi su drenajına elverişlilik,
- İlk yardım ve sağlık kurumlarına yakınlık gibi kriterler önemlidir (Koçali, 2016).

### 1.4. İşletme Alanında Güvenlik

Maden işletmesinin çevresi ve açılan basamakların sınırları tel çit ile güvenlik altına alınmalı ve üzerine yeterince ikaz levhası asılmalıdır. Yukarıdan taş düşmesi veya göçme ihtimali olan yerlere gerekli ikaz levhaları asılmalıdır (Erdim, 2015).

### 1.5. Basamaklarda Güvenlik

Basamaklar dik olmamalıdır. Kesinlikle dik basamak altında işçi çalıştırılmamalı ve basamak kenarlarında makina-ekipman ya da işçi düşmelerini önlemek için önlemler alınmalıdır Basamak şev eğimi 80 dereceden az olmalıdır. Üretimi kolaylaştırmak için ters eğim kesinlikle verilmemelidir (Erdim, 2015).

### 1.6. Kavlak Sökümü ve Kontrolü

Patlatmalardan, kar ve yağmur gibi doğal olaylardan sonra kademe yüzeylerinde deneyimli işçiler tarafından çatlak sökümü yapılmalıdır (Erdim, 2015).

Yüksekliği 5 metre ve eğimi 30 dereceden fazla olan şevlerde, kavlak sökümü vb. çalışmalarda işçilere emniyet kemeri ile baret, emniyet ayakkabısı vb. gibi kişisel koruyucu donanımlar verilip kullanılmalıdır (Koçali, 2016).

### 1.7. Tozla Mücadele

Martopikör (basınçlı hava tabancası) kullanırken toza kaşı sulama yapılmalı ve uygun nitelikte (diyaframlı) maske kullanılmalıdır (Erdim, 2015).

Pulverize basınçlı su sistemleri veya sulu ve jet filtreli su sistemleri ile toz oluşumu olan bölgeye buhar şeklinde su püskürtülerek tozun yere bastırılması sağlanabilmektedir. Stok sahasındaki toz oluşumunu ve rüzgar etkisiyle uçmasını engellemek amacıyla, stok nemlendirme işlemi yapılmalı veya yağmurlama sistemi kullanılmalıdır (Altınok, 2016).

### 1.8. Gürültüyle Mücadele

Martopikörle çalışırken veya vagonrille delik delinirken gürültüye karşı kulaklar manşon veya silikon tipi kulaklıklarla korunmalıdır (Koçali, 2016).

### 1.9. Tesislerde Güvenlik

Tesislerde alınacak olan en temel güvenlik önlemlerini şu şekilde sıralayabiliriz (Erdim, 2015):

- Acil durumlarda konveyör bandı durdurmak için bantın bir kenarına acil stop teli takılmalıdır.
- Tüm kayış ve kasnakların üzerine muhafaza takılmalıdır.
- Tamir ve bakım işleri için bantın bir kenarına korkuluklu bir yürüme yolu yapılmalıdır.

- Çalışma platformları ile merdivenlerin kenar korkulukları olmalıdır.
- Bunkerlerin önünde araç kaçmasını önlemek için en az 40 cm yükseklikte beton set ile üzerinde işçi düşmesini önleyecek ızgaralar olmalıdır.

### 1.10. Döküm Alanında Güvenlik

Döküm alanında ve varsa pasa alanında alınması gereken en temel güvenlik önlemlerini şu şekilde sıralayabiliriz (Özfirat, 2012):

- Görevli olmayan tüm işçilerin araç manevra alanına girmeleri önlenmelidir.
- Manevracı tüm operatörlerce görülebilecek güvenli bir yerde olmalıdır.
- Yağcılar operatörle net bir şekilde anlaşmadan ve makine tam stop etmeden makineye yaklaşmamalıdır.
- Sürücüler yükleme alanında araçlarından inmemelidir ve araçlarını çalışır vaziyette terk etmemelidir.
- Araçların düşmelerini önleyecek özellikte sağlam set yapılmalıdır.
- Manevracı reflektif şeritli yelek ve pantolon giymeli, tüm sürücüler tarafından görülecek güvenli bir yerde durmalıdır.

### 1.11. Patlatma İşlemlerinde Güvenlik

Patlatma işlemleri sırasında alınması gereken minimum önlemleri şu şekilde sıralayabiliriz (Erdim, 2015):

- Ateşçiler, kişisel koruyucu malzeme olarak statik elektrik oluşturmayacak iş elbisesi, anti statik iş ayakkabısı, baret, gözlük vb. kullanmalıdırlar.
- Ateşleyiciler, bir tüketim defteri tutmak ve her ateşlemeden sonra kullandıkları patlayıcı maddelerinin miktarını deftere yazmak zorundadırlar.
- Patlayıcı madde depoları yerüstü ve yeraltı olmak üzere başlıca iki şekilde yapılırlar.
- Patlayıcı madde depolarına giren ve çıkan patlayıcı maddeler kayıt altına alınır.
- Kapsüllerle diğer patlayıcı maddeler, aynı kap içinde bir arada bulundurulamaz ve taşınmazlar.
- Yerüstü patlayıcı madde depoları yıldırıma karşı korunmalıdır.

## 2. AÇIK OCAK MADEN İŞLETMELERİNDE İŞÇİ ANKETLERİ İSG ANKET ÇALIŞMASI UYGULAMASI

Türkiye'nin çeşitli illerindeki açık ocak maden işletmelerinde çalışan işçilere, maden işletmelerinde alınması gereken asgari iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin varlığı sorulmuştur. Bunun için bir anket hazırlanmış ve aşağıdaki bölümlerde yer verilen sorular sorulmuştur. Ayrıca internet üzerinden de aynı anket yapılarak daha çok katılım olması sağlanmış böylece daha çok veri ile yorum yapılması kolaylaşmıştır. Hazırlanan sorular madenlerde alınması gereken en temel iş sağlığı ve güvenliği önlemleridir. Bu soruları arttırmak tabii ki mümkündür fakat en basit haliyle isg kültürünün araştırılması planladığı için soruların ayrıntıları ankete konulmamıştır. Ankette sorulan sorular başlıklar haline ayrılarak işçilere sunulmuştur. Böylece işçinin farklı alanlardaki önlemler hakkında kendisini de ilgilendiren sorunları görmesi sağlanmıştır (Koçali, 2016).

Anket soruları toplamda 10 başlık altında toplanmıştır. Başlıklar aşağıda verilmiştir:

- İşçi Hakkında Bilgi
- Sağlık Kontrolleri
- Görev & Yetki
- Gözetim
- Üretim
- Elektrik
- Makina & Ekipman
- Patlatma
- Yangın
- Ortam (İşyeri ve Şantiye Hakkında Bilgi)

### 2.1. İşçi Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere sorulan sorular aşağıda verilmiştir:

- Göreviniz nedir?
- Kaç senedir madenlerde çalışıyorsunuz?

### 2.2. Sağlık Kontrolleri Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere sağlık kontrolleri hakkında sorulan sorular aşağıda verilmiştir:

- İşveren tarafından işe girişinizde sağlık raporları istendi mi?

- Gece vardiyasında çalışabilmeniz için hekim onayınız var mı?
- Göğüs filmi çektirildi mi?
- Gürültülü yerlerde çalışıyorsanız işitme testiniz yapıldı mı?
- Tetanos aşısı oldunuz mu?
- Mutfakta çalışan personelin 3 ayda bir muayeneleri yapılıyor mu?
- İşverenin İşlik Dosyası'nda düzenli olarak tuttuğunu düşünüyor musunuz?

### 2.3. Görev & Yetki Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere görev ve yetkileri ile ilgili sorular aşağıda verilmiştir:

- Maden ocağında görevli daimi nezaretçiniz sürekli ocakta mı?
- Daimi nezaretçinin defteri düzenli tutulduğunu ve tüm kayıtların işverence okunduğunu düşünüyor musunuz?
- Maden ocağında işçilere bildirilmiş Yıllık Eğitim Programı var mı?
- İşe ilk girişinizde ya da çalışma sürenizde “madende karşılaşılabileceğiniz tehlike ve riskler” ile ilgili eğitim verildi mi?
- Uyulması gereken uyarı ve ikazlar tanıtıldı ve mesleki güvenlik hakkında eğitim verildi mi?
- Mesleki yeterlilik belgeniz ya da işiniz için uygun diplomanız var mı?
- Madende Mesleki yeterlilik belgesi olmadan çalıştırılan işçiler var mı?
- Yaptığınız iş ile ilgili yazılı talimatlar var mı?
- Görev yetki ve sorumluluklarınızı biliyor musunuz?

### 2.4. Gözetim Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere gözetim ile ilgili sorular aşağıda verilmiştir:

- Maden ocağında “Risk Analizi ve Değerlendirmesi” yapıldı mı?
- Yapılmış ise; Bu çalışmaya katkınız oldu mu? Bu analiz ile ilgili size bilgi ve eğitim verildi mi?
- Yapılmamış ise; İşiniz ile ortaya çıkabilecek risklerin yüzde kaçına hâkimsiniz?

- Tozu önlemeye karşı gerekli tedbirler (pulvarize su, toz emme sistem, arozöz vb.) var mıdır?
- Toz ölçümü düzenli yapılıyor mu?
- Maden sahası/ocağı içindeki iletişim, uyarı, güvenlik ve alarm levhaları/işaretleri yeterli mi?
- Gürültü ölçümü yapılıyor mu?
- Madende çeşitli işler için kimyasal malzeme kullanıyor musunuz? “Malzeme Güvenlik Bilgi Formu” bulunuyor mu?
- Kişisel koruyucu donanım (baret, emniyet kemeri, toz maskesi, ayakkabı, kulaklık vb.) verildi mi?

### 2.5. Üretim Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere üretim ile ilgili sorular aşağıda verilmiştir:

- Maden sahasında asılı Detaylı Kademe Planı, İşletme Projesi, İmalat Planı ve Haritası var mı?
- Yapılan üretimler aylık olarak haritalar üzerine işleniyor mu?
- Açık Ocak İşletme Yönergesi var mı?
- Kademe oluşturduysanız şev açısı, genişliği, yüksekliği vb. güvenli üretim için sizce yeterli midir?
- Aynada çatlak/kavlak kontrolü yapılıyor mu?
- Kademeler üzerinde pasa, blok, fazla malzeme vb. bulunuyor mu?
- Şev kenarlarında aşağıya düşmeyi önleyici tedbirler alındı mı?
- Gece vardiyalarında tüm üretim alanları ve maden sahası yeterli olarak aydınlatılıyor mu?
- Gece çalışmalarında fosforlu iş elbisesi ve el feneriniz var mı?
- Döküm sahası ve pasa sahasında görevli işaretçi/manevracı var mı?
- Taşıt trafiği ve yaya trafiği için yollar belli ve uyarı levhaları var mı?

### 2.6. Elektrik Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere elektrik ile ilgili sorular aşağıda verilmiştir:

- Madendeki elektrik işlerinden sorumlu mühendis var mı?

- Elektrik tesisatı ve topraklama hattının yıllık kontrolü yapıp belgelendi mi?
- Elektrikli cihaz kullanıyorsanız bu cihazların gövde güvenlik topraklamaları ve kaçak akım rölesi var mı?
- Madende yıldırımdan korunmak için paratoner tesisatı var mı?
- Elektrik panolarının yerini biliyor musunuz?
- Bu pano önünde yalıtkan ızgara veya paspas var mı?
- Elektrik panolarının iç kapakları takılı ve bağlantı noktaları elektrik çarpmasına karşı koruma altına alınmış mı?
- Ana trafo binası çevresinde uyarı levhaları ve araçlar için manevra talimatı asılı mı?
- Tüm elektrik kabloları sizce güvenli mi?
- Gelişi güzel duran güvensiz elektrik kabloları var mı?

## 2.7. Makina & Ekipman Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere makine ve ekipmanlar ile ilgili sorulan sorular aşağıda verilmiştir:

- Kullanılan makine ve teçhizatlıların Kullanma Talimatları (nasıl çalıştırılacağı, bakım ve onarım işleri ile acil durumda yapılması gerekenler vb.) hazırlanarak çalışma yerlerine asılmış mı?
- Kompresörün hava tankının basınç testi ve kontrolü yapıp, belge düzenlenmiş mi?
- Kompresör hava tankının yeri patlamaya dayanıklı bir bölme içinde mi?
- Makinaların kayış-kasnak vb. hareketli aksamların koruyucuları var mı?
- Makine veya tesisin devreye gireceğini belirtir otomatik ikaz sistemi var mı?
- Basınçlı gaz tüpleri ayrı bölümlerde depolanıyor mu ve devrilmeye karşı sabitlenmiş mi?
- Oksijen kaynak takımında alev tutucu (geri tepme emniyet valfi) var mı?
- Zımpara taşının yan kapak koruyucusu var mı?
- Atölyelerde kaynak yapılan yerlerde özel çekiş havalandırma sistemi var mı?
- Makineler ve bantlar ile işyeri yan duvarı arasında insan geçişi için bırakılan mesafe uygun mu?

- Düşme tehlikesi bulunan yerlerde uygun korkuluk var mı?
- İş makinesi kullanan operatörlerin işe uygun ehliyeti var mı?
- İş makinelerinin geri vites ikaz alarmı var mı?
- İş makinesinin operatör kabini ve kabin önünde koruyucu ızgara var mı?
- Kaldırma araçlarının (vinç, ceraskal, forklift vb.) periyodik kontrolü yapılmış mı?
- Vinçlerde sesli ve ışıklı ikaz sistemi var mı?

## 2.8. Patlatma Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere patlatma ile ilgili sorulan sorular aşağıda verilmiştir:

- Ocakta patlayıcı madde kullanılıyor mu?
- Kullanılıyorsa "Patlayıcı Madde Kullanım Yönergesi" var mı?
- Patlayıcı madde deposu var mı?
- Bakanlığın izin vermediği türden yasaklanmış patlayıcı madde kullanılıyor mu?
- Patlayıcı maddeleri ateşleyen kişinin "Ateşleyici Yeterlik Belgesi" var mı?

## 2.9. Yangın Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere yangın ile ilgili sorulan sorular aşağıda verilmiştir:

- Yangın söndürme cihazları var mı?
- Periyodik kontrolleri yapılıyor mu?
- Yangın söndürme cihazlarının sayısı sizce yeterli mi?
- İş makinesi ve kamyonlarda yangın söndürme cihazı var mı?
- Yangın ve Acil Durum Tahliye tatbikatları yapılıyor mu?
- İşyerinde işçi sayısına göre % 10 oranında (3 kişiden az olmamak üzere) İlk yardım eğitimi almış eleman ve ilk yardım ekibi var mı?
- Yeterli sayıda çalışandan oluşturulmuş kurtarma istasyonu ve ekibi var mı?
- İşyerinde gerekli veya yeterli ilk yardım malzemesi, boyunluk ve seyyar sedye var mı?
- İşyerinde acil durumlar için uygun araç/araba var mı?

## 2.10. Ortam Hakkında Sorular

Anket yapılan işçilere işyeri ve şantiye ile ilgili sorular aşağıda verilmiştir

- Duş ve lavabolar sizce uygun mu?
- Yeterli sayıda, sağlıklı, temiz ve bakımlı tuvalet var mı?
- Soyunma yeri ve soyunma yerinde yeterli elbise dolabı var mı?
- Hijyen şartlara uygun temiz ve bakımlı yemekhaneniz var mı?
- Yatakhaneler hijyen şartlara uygun temiz ve bakımlı mı?
- İçilebilir şartlarda temiz su var mı?
- İşyeri termal konfor şartları açısından uygun mu?

## 3. ARAŞTIRMANIN BULGULARI

Anket çalışmasına Türkiye'nin çeşitli illerinde faaliyet gösteren 17 farklı açık ocak maden işletmesinden 43 işçi katılmıştır. Ortalama 9,27 yıl çalışanlar arasında yapılan ankette en az 6 ay çalışan makina yağcısı ile en çok 33 yıl çalışan kıdemli başmühendis katılımı sağlanmıştır.

Araştırma kapsamında işçilere sorulan "Sağlık Kontrolleri" başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Sağlık kontrolleri hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• İşveren tarafından İşe girişinizde sağlık raporları istendi mi?	87.5	12.5
• Gece vardiyasında çalışabilmeniz için hekim onayınız var mı?	65	35
• Göğüs filmi çektirildi mi?	75	25
• Gürültülü yerlerde çalışıyorsanız işitme testiniz yapıldı mı?	65	35
• Tetanos aşısı oldunuz mu?	67.5	32.5
• Mutfakta çalışan personelin 3 ayda bir muayeneleri yapılıyor mu?	60.5	39.5
• İşverenin İşlik Dosyası'nda düzenli olarak tuttuğunu düşünüyor musunuz?	70	30

Araştırma kapsamında işçilere sorulan "Görev & Yetki" başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Görev ve yetkileri kontrolleri hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Maden ocağında görevli daimi nezaretçiniz sürekli ocakta mı?	67.5	32.5
• Daimi nezaretçinin defteri düzenli tutulduğunu ve tüm kayıtların işverence okunduğunu düşünüyor musunuz?	47.5	52.5
• Maden ocağında işçilere bildirilmiş Yıllık Eğitim Programı var mı?	65	35
• İşe ilk girişinizde ya da çalışma sürenizde "madende karşılaşabileceğiniz tehlike ve riskler" ile ilgili eğitim verildi mi?	62.5	37.5
• Uyulması gereken uyarı ve ikazlar tanıtıldı ve mesleki güvenlik hakkında eğitim verildi mi?	62.5	37.5
• Mesleki yeterlilik belgeniz ya da işiniz için uygun diplomanız var mı?	72.5	27.5
• Madende Mesleki yeterlilik belgesi olmadan çalıştırılan işçiler var mı?	44	56
• Yaptığınız iş ile ilgili yazılı talimatlar var mı?	72.5	27.5
• Görev yetki ve sorumluluklarınızı biliyor musunuz?	69.2	30.8

Araştırma kapsamında işçilere sorulan "Gözetim" başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Gözetim kontrolleri hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Maden ocağında "Risk Analizi ve Değerlendirmesi" yapıldı mı?	77.5	22.5
• Yapılmış ise; Bu çalışmaya katkınız oldu mu? Bu analiz ile ilgili size bilgi ve eğitim verildi mi?	50	50
• Yapılmamış ise; işiniz ile ortaya çıkabilecek risklerin yüzde kaçına hâkimsiniz?	48.5	51.5
• Tozu önlemeye karşı gerekli tedbirler (pulvarize su, toz emme sistem, arozöz vb.) var mıdır?	60	40
• Maden sahası/ocağı içindeki iletişim, uyarı, güvenlik ve alarm levhaları/işaretleri yeterli mi?	56.4	43.6
• Gürültü ölçümü yapılıyor mu?	40	60
• Madende çeşitli işler için kimyasal malzeme kullanıyor musunuz? "Malzeme Güvenlik Bilgi Formu" bulunuyor mu?	48.7	51.3
• Kişisel koruyucu donanım (bare, emniyet kemeri, toz maskesi, ayakkabı, kulaklık vb.) verildi mi?	80	20

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “Üretim” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 4’te verilmiştir.

Çizelge 4. Üretim hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Maden sahasında asılı Detaylı Kademe Planı, İşletme Projesi, İmalat Planı ve Haritası var mı?	72.5	27.5
• Yapılan üretimler aylık olarak haritalar üzerine işleniyor mu?	55	45
• Açık Ocak İşletme Yönergesi var mı?	76.9	23.1
• Kademe oluşturduysanız şev açısı, genişliği, yüksekliği vb. güvenli üretim için sizce yeterli midir?	66.7	33.3
• Aynada çatlak/kavlak kontrolü yapılıyor mu?	74.4	25.6
• Kademeler üzerinde pasa, blok, fazla malzeme vb. bulunuyor mu?	56.4	43.6
• Şev kenarlarında aşağıya düşmeyi önleyici tedbirler alındı mı?	59	41
• Gece vardiyalarında tüm üretim alanları ve maden sahası yeterli olarak aydınlatılıyor mu?	62.5	37.5
• Gece çalışmalarında fosforlu iş elbisesi ve el feneriniz var mı?	60	40
• Döküm sahası ve pasa sahasında görevli işaretçi/ manevracı var mı?	44.7	55.3
• Taşıt trafiği ve yaya trafiği için yollar belli ve uyarı levhaları var mı?	47.5	52.5

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “Elektrik” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 5’te verilmiştir.

Çizelge 5. Elektrik hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Madendeki elektrik işlerinden sorumlu mühendis var mı?	47.5	52.5
• Elektrik tesisatı ve topraklama hattının yıllık kontrolü yapıp belgelendi mi?	65.8	34.2
• Elektrikli cihaz kullanıyorsanız bu cihazların gövde güvenlik topraklamaları ve kaçak akım rölesi var mı?	69.2	30.8

• Madende yıldırımdan korunmak için paratoner tesisatı var mı?	64.1	35.9
• Elektrik panolarının yerini biliyor musunuz?	64.1	35.9
• Bu pano önünde yalıtkan ızgara veya paspas var mı?	64.1	35.9
• Elektrik panolarının iç kapakları takılı ve bağlantı noktaları elektrik çarpmasına karşı koruma altına alınmış mı?	71.1	28.9
• Ana trafo binası çevresinde uyarı levhaları ve araçlar için manevra talimatı asılı mı?	69.2	30.8
• Tüm elektrik kabloları sizce güvenli mi?	52.5	47.5
• Gelişi güzel duran güvensiz elektrik kabloları var mı?	57.5	42.5

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “Patlatma” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 6. Patlatma hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Ocakta patlayıcı madde kullanılıyor mu?	60	40
• Patlatmalarda kullanılmak üzere siren sistemi var mı?	47.4	52.6
• Patlayıcı madde deposu var mı?	52.8	47.2
• Bakanlığın izin vermediği türden yasaklanmış patlayıcı madde kullanılıyor mu?	38.9	61.1
• Patlayıcı maddeleri ateşleyen kişinin “Ateşleyici Yeterlik Belgesi” var mı?	75	25

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “Patlatma” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Makine ve ekipman hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Kullanılan makine ve teçhizatlıların Kullanma Talimatları (nasıl çalıştırılacağı, bakım ve onarım işleri ile acil durumda yapılması gerekenler vb.) hazırlanarak çalışma yerlerine asılmış mı?	57.5	42.5
• Kompresörün hava tankının basınç testi ve kontrolü yapıp, belge düzenlenmiş mi?	66.7	33.3

• Kompresör hava tankının yeri patlamaya dayanıklı bir bölme içinde mi?	61.5	38.5
• Makinaların kayış-kasnak vb. hareketli aksamaların koruyucuları var mı?	76.9	23.1
• Makine veya tesisin devreye gireceğini belirtir otomatik ikaz sistemi var mı?	53.8	46.2
• Basınçlı gaz tüpleri ayrı bölümlerde depolanıyor mu ve devrilmeye karşı sabitlenmiş mi?	56.4	43.6
• Oksijen kaynak takımında alev tutucu (geri tepme emniyet valfi) var mı?	75.7	24.3
• Zımpara taşının yan kapak koruyucusu var mı?	65.8	34.2
• Atölyelerde kaynak yapılan yerlerde özel çekiş havalandırma sistemi var mı?	43.2	56.8
• Makineler ve bantlar ile işyeri yan duvarı arasında insan geçişi için bırakılan mesafe uygun mu?	70.3	29.7
• Düşme tehlikesi bulunan yerlerde uygun korkuluk var mı?	53.8	46.2
• İş makinesi kullanan operatörlerin işe uygun ehliyeti var mı?	79.5	20.5
• İş makinelerinin geri vites ikaz alarmı var mı?	76.9	23.1
• İş makinesinin operatör kabini ve kabin önünde koruyucu ızgara var mı?	71.8	28.2
• Kaldırma araçlarının (vinç, ceraskal, forklift vb.) periyodik kontrolü yapılmış mı?	69.2	30.8
• Vinçlerde sesli ve ışıklı ikaz sistemi var mı?	76.3	23.7

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “Yangın” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Yangın hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Yangın söndürme cihazları var mı?	68.4	31.6
• Periyodik kontrolleri yapıyor mu?	31.6	68.4
• Yangın söndürme cihazlarının sayısı sizce yeterli mi?	59.5	40.5
• İş makinesi ve kamyonlarda yangın söndürme cihazı var mı?	65.8	34.2
• Yangın ve Acil Durum Tahliye taktiklerini yapıyor mu?	65.8	34.2

• İşyerinde işçi sayısına göre % 10 oranında (3 kişiden az olmamak üzere) İlk yardım eğitimi almış eleman ve ilk yardım ekibi var mı?	69.2	30.8
• Yeterli sayıda çalışandan oluşturulmuş kurtarma istasyonu ve ekibi var mı?	55.3	44.7
• İşyerinde gerekli veya yeterli ilk yardım malzemesi, boyunluk ve seyyar sedyeler var mı?	56.4	43.6
• İşyerinde acil durumlar için uygun araç/araba var mı?	48.7	51.3

Araştırma kapsamında işçilere sorulan “İşyeri ve Ortam” başlığı altındaki sorulara verilen cevapların yüzde dağılımları Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. İşyeri ve şantiye ortamı hakkında cevaplar

Sorulan Soru	Evet	Hayır
• Duş ve lavabolar sizce uygun mu?	66.7	33.3
• Yeterli sayıda, sağlıklı, temiz ve bakımlı tuvalet var mı?	63.2	36.8
• Soyunma yeri ve soyunma yerinde yeterli elbise dolabı var mı?	66.7	33.3
• Hijyen şartlarına uygun temiz ve bakımlı yemekhaneniz var mı?	53.8	46.2
• Yatakhaneler hijyen şartlarına uygun temiz ve bakımlı mı?	48.6	51.4
• İçilebilir şartlarda temiz su var mı?	69.2	30.8
• İşyeri termal konfor şartları açısından uygun mu?	54.1	45.9

## SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Kaza riski oranı en yüksek iş kolu olan madencilikte, iş sağlığı ve güvenliğine yönelik yatırım ve önlemlerin alınması çok önemlidir. Ülkemizde; yüksek risk taşıyan, kuralsız ve denetimsiz çalışan, mühendislik bilim ve tekniğinden çok uzak, teknik eleman gözetim ve denetimi olmaksızın tamamen ilkel koşullarda çalışan pek çok maden işletmesi bulunmaktadır.

Bu araştırma kapsamında elde edilen iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili cevaplar ve yüzdeleri incelendiğinde madencilik sektörü olarak iş sağlığı ve güvenliği kültürünün tam anlamıyla yerleşmiş olmadığı görülmüştür.

Özellikle sektörel eğitimin daha yaygın ve kaliteli olarak yapılması, bürokratik olarak iş sağlığı ve



güvenliği kontrol ve teftişlerinin daha sık ve düzenli yapılması sayılan eksikliklerinin giderilmesini sağlayacaktır. Bu şekilde madenlerde yaşamını yitiren ya da sakat kalan işçilerin sayısının azalacağı ve madenlerin daha güvenli çalışma ortamı olacağını düşünebiliriz.

Madencilik şirketlerinin sosyal sorumluluk bilincinde olarak topluma ve çalışanlarına duyarlı yaklaşımda olmaları ve bu anlayış ile yatırımlarını öncelikli olarak insana ve teknolojiye yapmaları gerekmektedir. Gelişen teknoloji ve değişen şartlar sonrasında iş sağlığı ve güvenliği politikaları sürekli olarak güncellemeleri ve uygun zamanlarda da gözden geçirmelidirler. Bunu yaparken maden işletmelerinde çalışan tüm yükleniciler, tedarikçiler ve hatta ziyaretçiler de dahil olmak üzere madencilik faaliyetleri için hedeflerine ulaşmak için aşağıda belirtilen hususlara önem vermeleri gerekmektedir.

- Etkin ve sürekli gelişim sağlayan iş sağlığı güvenliği yönetimi için uygun nitelikte ve yetkin personel seçimi yapmak,
- İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yasal mevzuata, diğer gerekliliklere ve belirlenen işletme standartlarına tam olarak uyum sağlamak,
- İş sağlığı ve güvenliği risklerinin ve çevresel boyut ve etkilerin her seviyede tanımlandığı, değerlendirildiği ve yönetildiği yönetim sistemi oluşturularak ve uygulayarak, proaktif kültürün oluşumunu desteklenmek,
- Etkin uygulanabilir kararlar ve önlemler alabilmek için; kamu kurumları, toplum ve diğer paydaşlarla birlikte çalışan katılımının da sağlandığı şeffaf bir iletişim kurmak,
- Yükleniciler, tedarikçiler de dahil olmak üzere şirket çalışanlarının işbirliği içerisinde hareket ettiği, güvenli ve çevreye duyarlı çalışma koşullarını sağlamak için gerekli tüm ekipman ve sistemlerin temin edilmesini, çalışanların eğitilmesini ve performansımızın sürekli iyileştirilmesini sağlamak,
- İşletme ve tesislerinde uyguladığı yöntem ve teknoloji kullanımı ile iş gücü, doğal ve diğer kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını ve mak-

simum şekilde korunmasını sağlayarak, iş sağlığı ve güvenliği hususlarının uygulamasını şirketin tüm faaliyetlerinde bütünleştirmek,

- İş sağlığı ve güvenliği ile ilgili olay ve acil durum hallerine karşı hazırlıklı olmak, meydana gelmele-ri durumunda ise en az hasar için, etkili müdahale sistemlerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını sağlamak.

## TEŞEKKÜR

Çeşitli maden kazalarında yaşamını yitiren madencilere ve ailelerine hitaben yapılmış olan bu çalışmaya katılan ve tüm sorulara çekinmeden, içtenlikle cevap veren tüm madencilere teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

- Atak, S., 2010. Maden Mühendisliğine Giriş Ders Notu. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Yayınlanmamış, İstanbul.
- Altınok, A., 2016. Agregada Üretiminde İş Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.
- Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, 2012. KOBİ'ler İçin İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Rehberi. Ankara.
- Erdim, B., 2015. Madenlerde İş Güvenliği. İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitim Notları, Yayınlanmamış, İstanbul.
- Hacıfazlıoğlu, H., 2017. Maden İşletmelerinde İş Kazalarının Değerlendirilmesi. ST Ağır Sanayi Çözümleri Dergisi, ss.90.
- Koçali, K., 2016. Madencilik Sektörüne Yönelik İşçi Anketleri İle İSG Kültürü ve Uygulamasının Araştırılması. Yüksek Lisans Bitirme Projesi, İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ILO, 2001. Guidelines On Occupational Safety and Health Management Systems. Geneva: International Labour Office.
- Özkan, Ş., 2015. Maden Mühendisliğine Giriş Ders Notu. İstanbul Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Yayınlanmamış, İstanbul.
- Özırat, K., 2011. Açık Maden İşletmelerinde Alınması Gereken İş Güvenliği Önlemleri Ders Notu. Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Yayınlanmamış, İzmir.



Orijinal Araştırma / Original Research

## PERFORMANCE PREDICTION OF CHAIN SAW MACHINES USING SCHMIDT HAMMER HARDNESS

### SCHMIDT ÇEKİCİ SERTLİĞİ KULLANILARAK ZİNCİRLİ KESME MAKİNELERİNİN PERFORMANS TAHMİNİ

Arif Emre Dursun<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Selçuk Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, KONYA

Geliş Tarihi / Received : 16 October / Ekim 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 02 January / Ocak 2018

#### ABSTRACT

#### Keywords:

Chain saw machines,  
Specific energy,  
Schmidt hammer hardness,  
Rock cutting tests

Schmidt hammer hardness ( $R_L$ ) provides a quick and inexpensive measure of surface hardness that is widely used for estimating the mechanical properties of rock material such as strength, sawability, cuttability and drillability. In this study,  $R_L$  as predictors, which is thought to be a useful, simple and inexpensive test particularly for performance prediction of chain saw machine (CSM), is suggested. This study aims to estimate CSM performance from  $R_L$  values of rocks. For this purpose, rock cutting and rock mechanics tests were performed on twenty four different natural stone samples having different strength values. In this study, Chain Saw Penetration Index (CSPI) has been predicted based on  $R_L$  which is one of the two models previously used for performance prediction of CSMs. The  $R_L$  values were correlated with UCS, CSPI and SE using simple regression analysis with SPSS 15.0. As a result of this evaluation,  $R_L$  has a strong relation with UCS and SE. It is statistically proved that the model based on  $R_L$  for predicting CSPI is valid and reliable for performance prediction of CSM. Results of this study indicated that the CSPI of CSMs could be reliably predicted by empirical model using  $R_L$ .

#### ÖZ

#### Anahtar Sözcükler:

Zincirli kesme makineleri,  
Spesifik enerji,  
Schmidt çekici sertliği,  
Kaya kesme deneyleri

Schmidt çekici sertliği ( $R_L$ ) kayaların dayanım, kesilebilirlik (doğrusal ve dairesel) ve delinebilirlik gibi mekanik özelliklerini belirlemek için yaygın olarak kullanılan ucuz ve kolaylık sağlayan bir yüzey sertliği ölçüsüdür. Bu çalışmada, özellikle zincirli kesme makinesinin performans tahmininde, kullanışlı, basit ve ucuz bir test olan Schmidt çekici sertliği değişken olarak önerilmiştir. Bu çalışmada amaç, kayaların Schmidt sertliklerinden zincirli kesme makinelerinin performansını tahmin etmektir. Bunun için, farklı dayanım özelliklerine sahip 24 farklı doğal taş numunesi üzerinde kesme ve kaya mekaniği testleri yapılmıştır. Bu çalışmada, zincirli kesme makinelerinin performans tahmini için daha önce kullanılan iki modelden biri olan Zincirli Kesme Penetrasyon İndeksi (CSPI)  $R_L$  baz alınarak öngörülmüştür.  $R_L$  değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı, zincirli kesme indeksi ve spesifik enerji değerlerinin korelasyonu SPSS 15.0 istatistik programı kullanılarak yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda;  $R_L$  değerleri ile tek eksenli basınç dayanımı ve spesifik enerji değerleri arasında güçlü korelasyon olduğu belirlenmiştir. Buna göre; zincirli kesme indeksini tahmin etmek için  $R_L$ 'ye dayanan modelin zincirli kesme makinesinin performans tahmini için geçerli ve güvenilir olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, zincirli kesme makinelerinin zincirli kesme indeksini,  $R_L$  değerleri kullanılarak oluşturulan görgül modeller ile güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceğini göstermiştir.

\* Corresponding Author: [aedursun@selcuk.edu.tr](mailto:aedursun@selcuk.edu.tr) \* <https://orcid.org/0000-0003-2001-7814>

## INTRODUCTION

CSMs are used for the extraction of natural (dimensional) stones such as travertine and marble. They are used for cutting low-to medium-abrasive and soft-to medium-strength natural stones in both underground and surface quarrying operations, as well as in squaring operations. They cut relatively thin slots vertically or horizontally and are usually used in combination with diamond wire-cutting machines (Primavori 2006). Adding only one chain saw to the equipment fleet, in addition to diamond wire-cutting machines, improves the overall performance of a midsize quarry by about 20% (Copur et al. 2006). They eliminate time losses and labor for drilling boreholes for wire insertion when using with diamond wire-cutting machines, especially in high benches more than 6-7 m (eliminate collimation problems). They reduce production and time losses due to their ability of sumping horizontally or vertically to enter a new bench. They result in a directly saleable stone. They create an excellent working environment (regular and planar surfaces) for quarrying. They produce less dust and waste material compared to diamond-wire cutting machines (Sariisik and Sariisik 2010). The basic limitation of these machines is that they cannot cut hard, abrasive, and fractured stone deposits.

CSMs produce an excellent working environment, produce less waste material and dust, eliminate collimation problems encountered with diamond wire cutting machines, reduce time and production losses to enter a new bench, and produce directly saleable blocks (Mancini et al., 2001; Copur et al., 2006; Copur et al., 2011a; Primavori, 2006).

There are a few studies in the literature related to performance prediction of CSMs. Mancini et al. (1992, 1994) tested the parameters affecting the performance of different chain saw machines, and simulated geostatistically the chain cutting, the results were compared with the field performances of different CSMs working in different conditions. Mancini et al. (2001) investigated in situ chain saw applications in terms of cutting rates and tool wear rates. Primavori (2006) tested the operational conditions of CSMs in order to understand the effective usage of these machines. Copur et al. (2007) performed linear cutting tests to analyze the cutting characteristics of

CSMs. Copur et al. (2011a) suggested an empirical model based on CSPI for prediction of the areal net cutting rate (ANCR) of CSMs. In this model, UCS of the stones, useful cutting depth of the arms, and weight of the CSMs were used as predictors. Copur (2010) and Copur et al. (2011a, b) proposed another model based on the SE obtained from linear cutting tests in unrelieved cutting mode. Copur (2010) and Copur et al. (2011c) proposed a deterministic model in order to predict ANCR of CSMs. Sariisik and Sariisik (2013) analyzed the cutting performance of a CSM, and the results obtained from the field were compared with diamond wire cutting results. According to their study, block efficiency in natural stone quarries increased by up to 60-80 % with the use of CSM. Tumac (2014) suggested a model based on Shore hardness values and deformation coefficient for prediction of CSPI and ANCR of CSMs. The Shore hardness values have been used to improve two models previously developed based on the CSPI and SE.

This paper is concerned with establishing empirical prediction model for CSPI of CSM based on  $R_L$  values. The relation between Schmidt hardness, UCS and SE were investigated. For this purpose, rock cutting and rock mechanics tests were performed on twenty four samples representing marble, travertine and tuff, obtained from sites around Konya province. Two empirical models for prediction of the ANCR of the CSMs were developed by Copur et al. (2011a). One of the models is based on the CSPI, and uses the UCS values of the stone, weight of the CSM and useful cutting depth of the arm as predictor parameters. The other model is based on the results of linear cutting experiments performed in the unrelieved cutting mode with a standard chisel tool and uses SE as the predictor parameter. They suggested empirical models based on CSPI and linear cutting experiments are energy as the predictor parameter are also statistically verified and proved to be a very useful and reliable tool for prediction of ANCR of CSMs. In these models, they have been used six different rock samples including marble, travertine and overburden.

In this study, the CSPI model is revised using  $R_L$  values. To develop the proposed models, the database that is composed of  $R_L$ , UCS and also

SE values including unrelieved cutting modes were established using the dataset obtained from experimental studies. The model is based on a revised CSPI, which uses  $R_L$ , machine weight, and useful arm cutting depth as predictors. The  $R_L$  values were used for predicting of CSPI, UCS and SE. The CSPI model developed previously are improved by using  $R_L$  values for the prediction of chain saw machines. According to the regression analysis, the CSPI can be predicted through  $R_L$  values of rocks.

## 1. LABORATORY STUDIES

The testing program in this study included rock cutting and rock mechanics tests. Additionally, mineralogical and petrographic analyses were performed on rock samples. A total twenty-four different rock samples having different strength values representing marble, travertine and tuff collected from sites around Konya province of, Turkey for small-scale linear rock cutting and rock mechanics tests. Rock block samples were transported to the Rock Mechanics Laboratory in the Mining Engineering Department of Selcuk University. Cylindrical core specimens were prepared from block samples for rock mechanics tests and block samples were prepared for rock cutting tests. The standard testing procedures suggested by the ISRM (International Society for Rock Mechanics) for testing cuttability and mechanical properties of rocks.

### 1.1. Rock mechanics tests

All tests were carried out in the laboratory for determination of physical and mechanical properties of rock samples. Cylindrical core specimens NX (54 mm) in diameter were prepared from block samples by drilling in such a way that the drilling direction was perpendicular to the plane of the thin section. The standard testing procedures suggested by the ISRM for testing mechanical properties of rock were followed throughout the tests (ISRM 2007). The results of the tests related to the determination of the engineering properties of the samples are summarized in Table 1 and testing procedures are briefly given below. The tests were repeated at least ten times for each rock type and the average value was recorded.

The UCS values were determined on a hydraulic testing machine with a capacity of 3000 kN. The loading rate was applied within the limits of 2 kN/sec. Cylindrical specimens NX in diameter with a length to diameter ratio of 2.5:1 were used.

Schmidt hammer rebound tests were applied on the test samples having an approximate dimension of 30 x 30 x 20 cm<sup>3</sup>. The tests were performed with a Proceq L-type digital Schmidt hammer with impact energy of 0.735 Nm. 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 (2007) recommendations were applied for each rock type. ISRM suggested that 20 rebound values from single impacts separated by at least a plunger diameter should be recorded, and the upper ten values averaged.

### 1.2. Rock cutting tests

The small-scale rock cutting test has been developed for the purpose of measuring direct cuttability of a given rock. The test rig which is a modified Kloop shaping machine having a stroke 450 mm and a power of 4 kW was used (Fig. 1). The rig which is similar to the one originally developed by McFeat-Smith and Fowell (1977, 1979) is located in the laboratories of the Mining Engineering Department at Selcuk University. In this study, rectangular blocks of rock samples of 30x30x10 cm were fixed in a table of a shaping machine and cut by a chisel pick having a rake angle of -5°, a clearance angle of 5°, and a tool width of 12.7 mm. The depth of cut was selected as 2 mm in unrelieved cutting mode. The cutting speed was around 36 cm/s and the data acquisition rate was 1,000 Hz. In this study, 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 were used. During the rock cutting tests the tool forces in cutting directions are recorded by using platform type load cell with capacity of 750 kg, a data acquisition card and block diagrams in Matlab Simulink as illustrated in Fig. 2.

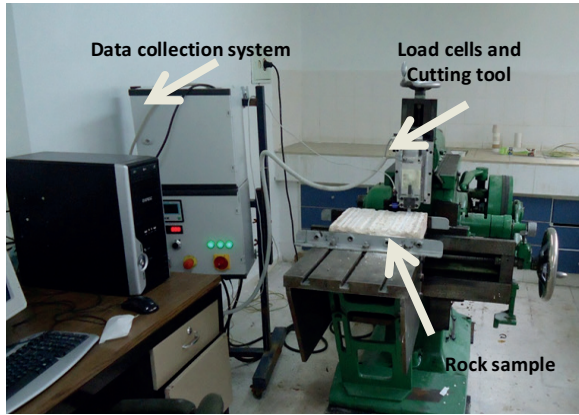


Figure 1. Small-scale rock cutting test rig (Dursun, 2012)

Three tests were carried out on each rock sample in which mean cutting forces were recorded. After each cutting test, the length of cut was measured and the rock cuttings for the cut were collected and weighed for determination of specific energy. Specific energy is calculated using the formula below:

$$SE = [(FC.L)/Q] \times 10^{-1} \quad (1)$$

where SE is the specific energy in MJ/m<sup>3</sup> or kWh/m<sup>3</sup>, FC the average cutting force acting on the tool in kN, L the cutting length in cm, Q the volume cut, in cm<sup>3</sup> (Q = Y/D), Y the yield in gr, D the density in g/cm<sup>3</sup>.

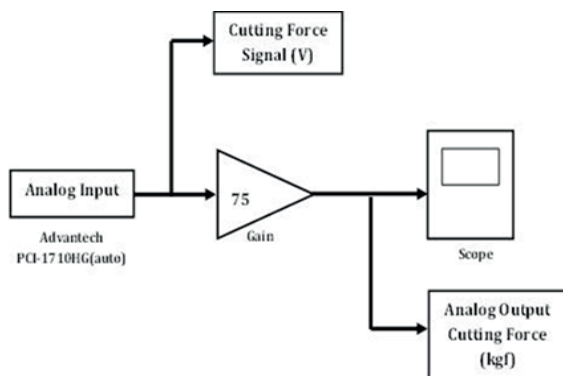


Figure 2. Block diagrams in Simulink for cutting forces

## 2. EVALUATION OF THE RESULTS

The average results of rock cutting and rock mechanics tests 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, Brazilian tensile strength (BTS) from 1.05 to 6.88 MPa, P-wave velocity (Vp) from 1.88 to 6.58 km/s, R<sub>L</sub> from 25.95 to 80.26, density (ρ) from 1.43 to 2.77 g/cm<sup>3</sup> and the SE values range from 1.58 to 17.63 kWh/m<sup>3</sup>.

### 2.1. Prediction of UCS and SE from R<sub>L</sub> values

The Schmidt hammer hardness value is one of the physico-mechanical properties of the rock. Schmidt hammer test is very simple and inexpensive test to conduct and the rebound value is a good indicator of mechanical properties of rock material (Bilgin et al., 2002).

Some researchers found strong correlations between Schmidt hardness value and the cutting rate of roadheaders, tunnel boring machines and impact hammers (Bilgin et al., 1996, 2002; Howarth et al., 1986; Poole and Farmer, 1978; Goktan and Gunes, 2005). Additionally, Schmidt hammer value is used in rock cutting applications and sawability for prediction of performance of the cutting process (Kahraman et al. 2004; Ersoy and Atici, 2005; Yurdakul and Akdas, 2012).

In this study, relations between R<sub>L</sub>, SE and UCS was analyzed using regression analysis method with SPSS 15.0. The relation between UCS and R<sub>L</sub> are presented in Fig. 3. According to the simple regression analysis for all data, the exponential function showed significant relation between UCS and R<sub>L</sub> values of rocks. The estimation of the UCS from R<sub>L</sub> is given in Eq. 2. The regression coefficient (R<sup>2</sup>) for this equation is 0.891. The relation between SE and R<sub>L</sub> are presented in Fig. 4. According to the simple regression analysis for all data, the power function showed significant relation between SE and R<sub>L</sub> values of rocks. The estimation of the SE from R<sub>L</sub> is given in Eq. 3. The regression coefficient (R<sup>2</sup>) for this equation is 0.936. The equations of curves are given as follows:

$$UCS = 2.180e^{0.048R_L} \quad (2)$$

$$SE = 0.002R_L^{2.181} \quad (3)$$

where UCS is uniaxial compressive strength in MPa, SE is specific energy in kWh/m<sup>3</sup> and R<sub>L</sub> is Schmidt hardness value.

R<sub>L</sub> has a meaningful correlation with UCS and SE, with a strong coefficient of determination and in these models.

## 2.2. Model development studies by using R<sub>L</sub> values

Predicting performance of mechanical miners is very important for feasibility and planning purposes. There are some prediction models in the literature for performance prediction of mechanical miners. The model based on instantaneous cutting rate of mechanical miner developed by Rostami et al. (1994) has been more frequently used in these models. Net cutting rate, also called as instantaneous cutting rate, of

a mechanical miner can be estimated by using Eq. (4).

$$\text{NCR} = kP/SE_{\text{opt}} \quad (4)$$

where NCR is the net cutting rate in m<sup>3</sup>/h, SE<sub>opt</sub> is the optimum specific energy in kWh/m<sup>3</sup> obtained from linear cutting tests, P is the cutting power of the excavation machine in kW, and k is coefficient related to the transfer of cutting to the rock depending on the type of mechanical miner.

Limited researches have been performed for performance prediction of CSMs. Two empirical models were developed and used to predict the performance of CSM by Copur et al. (2011a). One of the models depends on the stone, machine and operational parameters as predictors, which are normalized as the CSPI. The other model depends on linear cutting tests and uses SE as the predictor. In this study, the CSPI has been improved by using the R<sub>L</sub> values of rocks.

Table 1. Rock cutting and rock mechanics tests results

Rock Code Number	Rock Type	UCS (MPa)	BTS (MPa)	V <sub>p</sub> (km/s)	R <sub>L</sub>	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	FC (kN)	SE (kWh/m <sup>3</sup> )
1	Travertine	18.56 ±2.57	1.75 ±0.23	4.03 ±0.17	47.78 ±4.49	2.16 ±0.05	1.12	8.26
2	Travertine	27.55 ±4.06	2.94 ±0.90	4.16 ±0.28	45.63 ±2.17	2.26 ±0.08	1.02	7.91
3	Travertine	30.69 ±5.19	2.96 ±0.57	4.70 ±0.21	53.30 ±2.15	2.36 ±0.10	1.47	10.05
4	Travertine	32.23 ±4.83	3.74 ±0.98	5.22 ±0.37	61.67 ±1.87	2.40 ±0.09	1.42	12.19
5	Travertine	25.95 ±8.60	2.86 ±0.71	4.88 ±0.28	52.71 ±3.15	2.33 ±0.03	1.51	7.97
6	Travertine	28.11 ±10.46	3.01 ±0.63	5.38 ±0.14	49.16 ±0.82	2.39 ±0.06	1.25	10.82
7	Travertine	14.82 ±3.84	2.96 ±0.31	4.57 ±0.18	48.05 ±1.02	2.24 ±0.04	1.39	9.01
8	Travertine	19.22 ±6.58	2.79 ±0.59	4.31 ±0.36	45.52 ±3.42	2.46 ±0.05	0.99	8.68
9	Travertine	22.45 ±6.02	3.44 ±0.86	4.19 ±0.19	51.29 ±1.51	2.48 ±0.06	1.50	9.67
10	Travertine	28.19 ±5.47	4.24 ±0.65	4.92 ±0.08	53.93 ±1.33	2.52 ±0.03	1.33	10.74
11	Travertine	43.95 ±8.45	4.83 ±1.25	4.12 ±0.06	53.52 ±1.93	2.48 ±0.06	1.30	9.00
12	Marble	71.98 ±11.41	6.51 ±1.29	6.58 ±0.15	70.14 ±1.23	2.71 ±0.03	2.15	17.63
13	Marble	80.73 ±25.88	4.43 ±0.55	6.54 ±0.03	65.49 ±1.80	2.70 ±0.07	1.81	17.28
14	Marble	56.16 ±12.77	6.04 ±0.63	5.98 ±0.44	69.63 ±2.19	2.66 ±0.01	1.99	17.41
15	Marble	54.63 ±8.61	4.22 ±0.89	6.26 ±0.30	61.44 ±1.33	2.74 ±0.06	1.90	11.71
16	Marble	58.87 ±12.98	4.76 ±1.61	4.22 ±0.34	70.50 ±1.95	2.77 ±0.06	1.74	13.26
17	Marble	71.18 ±9.79	6.88 ±1.21	6.39 ±0.16	80.26 ±2.86	2.77 ±0.03	1.68	16.69
18	Tuff	19.67 ±4.94	1.96 ±0.61	2.63 ±0.06	47.75 ±4.73	1.82 ±0.003	0.66	4.84
19	Tuff	4.44 ±1.18	1.05 ±0.09	1.88 ±0.08	26.66 ±0.92	1.43 ±0.02	0.20	1.58
20	Tuff	7.86 ±1.27	1.39 ±0.12	2.17 ±0.03	27.27 ±0.88	1.50 ±0.01	0.23	1.71
21	Tuff	11.86 ±0.79	1.52 ±0.14	2.28 ±0.03	33.79 ±0.87	1.67 ±0.01	0.45	3.08
22	Tuff	11.23 ±2.10	1.59 ±0.35	2.23 ±0.14	28.59 ±2.13	1.72 ±0.09	0.31	2.73
23	Tuff	8.23 ±1.72	1.19 ±0.46	2.21 ±0.05	30.21 ±2.18	1.66 ±0.03	0.32	2.84
24	Tuff	9.35 ±1.17	1.78 ±0.36	2.29 ±0.04	25.95 ±2.17	1.57 ±0.01	0.27	2.02

UCS: Uniaxial compressive strength, BTS: Brazilian tensile strength, V<sub>p</sub>: P wave velocity, R<sub>L</sub>: Schmidt hammer hardness, ρ: Density FC: Cutting force, SE: Specific energy.

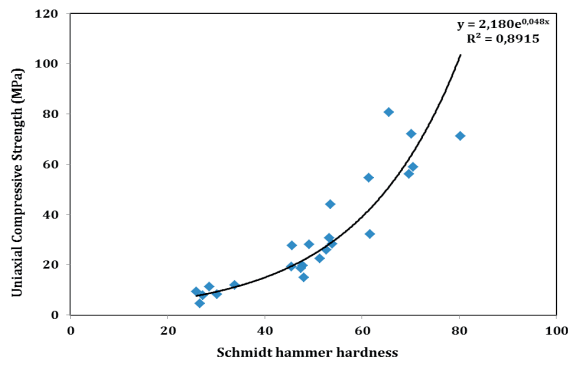


Figure 3. Relation between Schmidt hammer hardness and UCS values

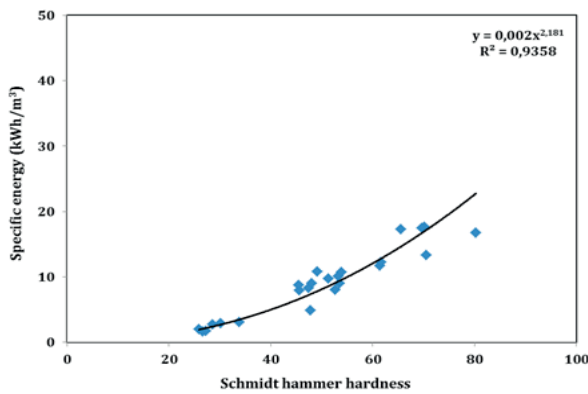


Figure 4. Relation between Schmidt hammer hardness and SE values

The CSPI is given in Eq. 5 (Copur et al. 2011a; Tumac, 2014):

$$CSPI = WH/UCS \tag{5}$$

where CSPI is the chain saw penetration index in m<sup>3</sup>, W is the weight of chain saw machine in tons, H is the useful arm cutting depth in m, and UCS is the uniaxial compressive strength of the stone in MPa. The UCS can be estimated from relationship between UCS and R<sub>L</sub> values given in Eq. 2 in order to determine the CSPI. This equation can be rewritten as the predicted chain saw penetration index (CSPI<sub>pre</sub>), shown in Eq. 6:

$$CSPI_{pre} = \frac{WH}{2.180e^{0.048RL}} \tag{6}$$

where CSPI<sub>pre</sub> is the predicted chain saw penetration index in m<sup>3</sup>, W is the weight of chain saw machine in tons, H is the useful arm cutting depth in m, e is the base of the natural logarithm, and R<sub>L</sub> is the Schmidt hammer hardness value.

In this study, the performance prediction of a CSM based on CSPI were calculated for the tested stones using Eq. 5 and given in Table 2, which were developed by Copur et al. (2011a). This equation can be rewritten as the revised CSPI, given Eq. 6. This model was improved using Schmidt hardness value. The predictors used in these models such as machine weight (W), useful arm cutting depth (H) are assumed to be 5.5 tons, 2.6 m, respectively, which can be obtained from Copur et al. (2011a). Detailed field performances and technical features of chain saw machines can be seen in previous study performed by Copur et al. (2011a). Table 2 shows the predicted CSPI, UCS and SE based on R<sub>L</sub> values using simple regression analysis with SPSS 15.0. The UCS requirement of the model developed by Copur et al. (2011a) needs core samples, and the sample preparation and tests take a long time; however, R<sub>L</sub> values in the improved model is obtained from Schmidt hammer test, which is an easy, inexpensive and practical test.

A good correlation was found between the calculated CSPI using Eq. 5 developed by Copur (2011a) and predicted CSPI<sub>pre</sub> using Eq. 6 based on R<sub>L</sub> values of rocks as seen in Fig. 5. The relation follows a power function with coefficient of determination (R<sup>2</sup>) value was 0.892. In this model which revealed the regression equation, the regression parameters were all significant (p=0.000). The equation of the curve is:

$$\text{Model 1: } CSPI = 0.999CSPI_{pre}^{1.004} \tag{7}$$

where CSPI is the chain saw penetration index in m<sup>3</sup>, CSPI<sub>pre</sub> is the predicted chain saw penetration index by using Eq. 6 in m<sup>3</sup>.

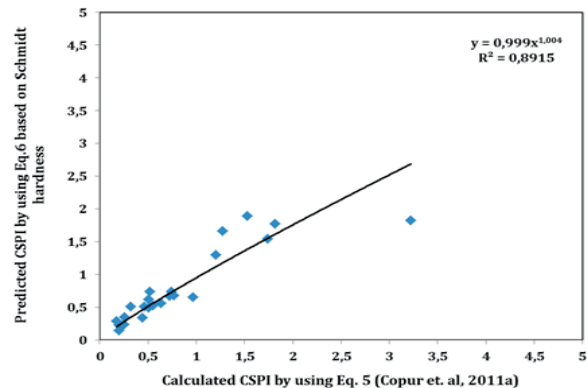


Figure 5. Relation between predicted and calculated CSPI

Table 2. Summary of the predictions of UCS, SE and CSPI based on  $R_L$  values

Rock Code Number	Rock Type	H* (m)	T* (m)	W* (tons)	P <sup>cutting</sup> *(kW)	Predicted UCS (Eq.2)	Predicted SE (Eq.3)	Calculated CSPI (Eq.5)	Predicted CSPI (Eq.6)
1	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	21.29	9.07	0.77	0.67
2	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	19.48	8.31	0.52	0.73
3	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	28.16	11.67	0.47	0.51
4	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	42.08	16.04	0.44	0.34
5	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	27.37	11.39	0.55	0.52
6	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	23.08	9.78	0.51	0.62
7	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	21.88	9.31	0.96	0.65
8	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	19.38	8.27	0.74	0.74
9	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	25.57	10.73	0.64	0.56
10	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	29.02	11.97	0.51	0.49
11	Travertine	2.6	0.042	5.5	11.4	28.45	11.77	0.33	0.50
12	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	63.18	21.24	0.20	0.23
13	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	50.54	18.29	0.18	0.28
14	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	61.66	20.90	0.25	0.23
15	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	41.61	15.91	0.26	0.34
16	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	64.29	21.47	0.24	0.22
17	Marble	2.6	0.042	5.5	11.4	102.70	28.49	0.20	0.14
18	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	21.57	9.18	0.73	0.66
19	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	7.84	2.58	3.22	1.82
20	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	8.07	2.71	1.82	1.77
21	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	11.04	4.32	1.21	1.30
22	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	8.60	3.00	1.27	1.66
23	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	9.29	3.38	1.74	1.54
24	Tuff	2.6	0.042	5.5	11.4	7.58	2.43	1.53	1.89

\*The predictors of field performance of a chain saw machine used in this study were obtained from Copur et al. (2011a)

The predictive performances of the models were compared in order to determine the applicability of the models obtained. RMSE (Root Mean Square Error) (Eq. 8), coefficient of determination ( $R^2$ ) and adjusted coefficient of determination (Adj.  $R^2$ ) were used for the purpose of measuring the predictive performance of the models. A summary of the model generated for simple regression analysis is given in Table 3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2} \tag{8}$$

where  $o_i$  is the measured value,  $t_i$  is the predicted value and  $N$  is the number of the samples.

The performance indices above can be interpreted as follows: if the RMSE is low, then the model performs better also for a good predictive model, the value of  $R^2$  and Adj.  $R^2$  are expected to be close to 1 (Gokceoglu, 2002; Gokceoglu and Zorlu, 2004).

Table 3. Summary of the generated models for simple regression analysis

Model	R	$R^2$	Adj. $R^2$	RMSE	Std. Est	p value
1	0.946	0.892	0.890	0.32	0.261	0.00

**CONCLUSIONS**

This paper aims to develop easy and inexpensive prediction models to help performance prediction of



CSM.  $R_L$  value is used in rock cutting applications, the cutting rate of roadheaders, tunnel boring machines and impact hammers and sawability for prediction of performance of the cutting process. However,  $R_L$  has not been used for performance prediction of CSM. This is one of the research activities differentiating this research from similar previous work. Relatively few published studies are available on the relation between Schmidt hardness and performance prediction of CSM. The simple regression technique used in this paper demonstrated very satisfactory results in predicting CSPI. The aim of this study is to assess and discuss the efficiency of  $R_L$  values on the performance prediction of CSM. For this purpose, CSPI were calculated using equation developed by Copur et al. (2011a). The UCS requirement of the model developed by Copur et al. (2011a) needs core samples, and the sample preparation and tests take a long time; however,  $R_L$  values in the improved model is obtained from Schmidt hammer test, which is an easy, inexpensive and practical test. The empirical models based on  $R_L$  values are statistically verified and proved to be useful and reliable tool for prediction of CSPI. The  $R_L$  values are strongly correlated between UCS and SE obtained from linear cutting tests performed by using standard chisel tool in the unrelieved cutting mode. According to  $R^2$ , Adj.  $R^2$  and RMSE values, it is thought that the proposed Schmidt hammer hardness test in this work may be used as a preliminary guide for performance prediction of chain saw machines, for cutting stone in the production of natural stone quarry blocks.

## REFERENCES

Bilgin, N., Yazici, S., Eskikaya, S., 1996. A Model to Predict the Performance of Roadheader and Impact Hammers in Tunnel Drivages. In: Proc. Eurock '96 Rotterdam: Balkema, 715-720.

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 Technology, July 17 (3), 237-247.

Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D., Feridunoglu, C., Dincer, T., Serter, A., 2006. Cutting Performance of Chain Saw Machines in Quarries and Laboratory. In: Proc. of the 15<sup>th</sup> Int. Symp. on Mine Planning and

Equipment Selection, Turin, Italy, September, 1324-1329.

Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D., Duzyol, I., 2007. Full-scale Linear Cutting Tests Towards Performance Prediction of Chain Saw Machines. In: Proc. of the 20<sup>th</sup> Int. Mining Congress Exhibition (IMCET 2007), Ankara, Turkey, June, 161-169.

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., 2011a. 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.

Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D., Avunduk, E., Demirel, S., Simsek, A., 2011b. An Empirical Model for Predicting the Performance of Chain Saw Machines. In: Proc. of the 3<sup>rd</sup> Mining Machinery Symposium, Izmir, Turkey, May, 55-65 (in Turkish).

Copur, H., Balci, C., Bilgin, N., Tumac, D., Avunduk, E., Saracoglu, M.A., Serter, A., 2011c. A Deterministic Model for Predicting and Optimizing Performance of Chain Saw Machines. In: Proc. of the 22<sup>nd</sup> World Mining Congress and Expo, Istanbul, Turkey, September, 175-181.

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).

Ersoy, A., Atici, U., 2005. Specific Energy Prediction for Circular Diamond Saw in Cutting Different Types of Rocks Using Multivariable Linear Regression Analysis. J. Min. Sci., 41, 240-260.

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., 23, 171-175.

- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. In: Ulusay, R., Hudson, J.A. (Eds.), ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.
- Kahraman, S., Fener, M., Gunaydin, O., 2004. Predicting the Sawability of Carbonate Rocks Using Multiple Curvilinear Regression Analysis. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 1123-1131.
- Mancini, R., Cardu, M., Fornaro, M., Linares, M., Peila, D., 1992. Analysis and Simulation of Stone Cutting with Microtools. In: Proc. of the 3rd Int. GeoEngineering Conference, Torino, Italy, September, 227-236.
- Mancini, R., Linares, M., Cardu, M., Fornaro, M., Bobbio, M., 1994. Simulation of the Operation of a Rock Chain Cutter on Statistical Models of Inhomogeneous Rocks. In: Proc. of the 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, Istanbul, Turkey, October, 461-468.
- Mancini, R., Cardu, M., Fornaro, M., Toma, C.M., 2001. The Current Status of Marble Chain Cutting. In: Proc. of the 9th Int. Symp. on Mine Planning and Equipment Selection, New Delhi, India, November, 151-158.
- 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. 4<sup>th</sup> 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.
- Primavori, P., 2006. Uses for The Chain Saw. *Marmo Mach. Int.*, 53, 80-102.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D., 1994. Performance Prediction, A Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining. *Mining Engineering*, November, 1264-1267.
- Sariisik, A., Sariisik, G., 2010. Efficiency Analysis of Armed-Chained Cutting Machines in Block Production in Travertine Quarries. *The Journal of Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 110:473–480.
- Sariisik A., Sariisik G., 2013. Investigation of The Cutting Performance of the Natural Stone Block Production in Quarries with Armed Chain Cutting Machine. *Proc. Inst. Mech. Eng. C. J. Mech. Eng. Sci.* 227:155–165.
- Tumac, D., 2014. Predicting The Performance of Chain Saw Machines Based on Shore Scleroscope Hardness. *Rock. Mech. Rock. Eng.*, 47, 703-715.
- Yurdakul, M., Akdaş, H., 2012. Prediction of Specific Cutting Energy for Large Diameter Circular Saws During Natural Stone Cutting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 53, 38-44.





Orijinal Araştırma / Original Research

## MERMER ARTIKLARINDAN ÖĞÜTÜLMÜŞ KALSİYUM KARBONAT (GCC) ÜRETİMİ: YAŞ VE KURU ÖĞÜTME ÜRÜNLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

THE PRODUCTION OF GROUND CALCIUM CARBONATE (GCC) FROM MARBLE WASTES: COMPARISON OF WET AND DRY GRINDING PRODUCTS

Mustafa Ercan<sup>a,\*</sup>, Selçuk Koltka<sup>b,\*\*</sup>, Eyüp Sabah<sup>b,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Ermaş Madencilik San. Tur. Tic. A.Ş., MUĞLA

<sup>b</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, AFYONKARAHİSAR

Geliş Tarihi / Received : 6 Kasım / November 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 27 Aralık / December 2017

### ÖZ

**Anahtar Sözcükler:**  
GCC,  
Mermer artığı,  
Yaş/kuru öğütme

Bir çok endüstriyel uygulamada kullanılan öğütülmüş kalsiyum karbonat (GCC), uygun kalite/standartta üretildiğinde ve dünya pazarlarına satış için lojistik fırsatlar sağlandığında katma değeri yüksek bir üründür. Ermaş Madencilik Yatağan ocağı pasa sahasında bulunan mermer artıkları yüksek saflık ve beyazlık derecesine sahiptir. Kira ödemek suretiyle orman arazilerinde stoklanan ve estetik görünüm kadar ekolojik açıdan da kirlilik oluşturan mermer artıklarından, kâğıttan boyaya, plastikten gıda, yapı, ilaç ve kozmetiğe vs. birçok sektörde kullanım alanı bulan GCC üretmek mümkündür. Bu makalede, yüksek saflık ve beyazlık derecesine sahip Muğla Beyazı mermer artıklarından, pek çok sektörde kullanılabilecek GCC üretimi için karıştırmalı biyalı değirmende gerçekleştirilen yaş/kuru öğütme girdi ve çıktı değişkenlerine ait verilere (stres şiddeti, spesifik enerji tüketimi, diklik faktörü, d50) ve elde edilen mikronize GCC ürünlerinin özelliklerine (tane boyutu, beyazlık, BET özgül yüzey alanı, yağ emme) yer verilmiştir. Ayrıca; yaş (Ermaş 1, Ermaş 2) ve kuru (Ermaş 3) mikronize öğütme ürünleri, global pazarda işlem gören muadilleri ile karşılaştırılmıştır.

### ABSTRACT

**Keywords:**  
GCC,  
Marble wastes,  
Wet/dry grindin

Ground calcium carbonate (GCC), which is used in many industrial applications, is a high value added when it is produced in the appropriate quality/standard and the logistically conducive global markets. Marble residues stockpiled in the open marble quarry of Ermaş-Yatağan Marble have high purity and whiteness degree. Marble residues stocked in forest rented land created pollution from ecological point of view as well as aesthetic appearance. However, it is possible to produce GCC which is used in many sectors such as paper, dyes, plastic, food, building & construction, medicine, cosmetics, and others. This paper describes a study carried out to obtain data on stress intensity, specific energy consumption, steepness factor, d50 through grinding variables in a stirred media mill under wet/dry grinding. We have also determined the properties of the micronized GCC products (particle size, whiteness, BET specific surface area, oil absorption) for the production of GCC of Muğla Beyazı marble residues with high purity and degree of whiteness. Moreover; the micronized wet (Ermaş 1, Ermaş 2) and dry (Ermaş 3) grinding products were compared with their equivalents trading in global markets.

\* mustafa@ermasmarble.com • <https://orcid.org/0000-0002-7561-044X>

\*\* selcukkoltka@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-7631-3829>

\*\*\* Sorumlu yazar: esabah@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-5225-0891>

## GİRİŞ

Günümüzde ekonomik kalkınma, ülkenin sahip olduğu maden kaynakları, miktarı ve maden ürünlerinin tüketimi ile paralellik göstermektedir. Dünyanın en zengin mermer yataklarının bulunduğu Alp kuşağında yer alan ve 13,9 milyar ton (5,1 milyar m<sup>3</sup>) muhtemel mermer rezervine sahip olan Türkiye, bu rezervi ile dünyada tahmin edilen 15 milyar m<sup>3</sup>lük rezervin %33'üne sahiptir (TC Ekonomi Bakanlığı, 2016). Bu zenginlik Türkiye doğaltaş sektörünü ülke madenciliği için umut vaat eder bir konuma getirmiş, 80'li yıllardan itibaren çok hızlı bir gelişme trendi yakalayıp gerek üretim potansiyeli gerekse ihracat ve istihdam açısından ülke ekonomisine önemli katkı sağlayan sektörlerden biri konumuna gelmiştir. Özellikle son yıllarda büyük firmaların yapmış olduğu yatırımlar, uygulamaya konulan modern ocak-üretim yöntemleri ve son teknikler, deniz ulaşımında nakliye kolaylığı ile üretim ve ihracatı düzenli bir şekilde artan sektör, dünya doğal taş piyasasında üst sıralarda yerini almıştır. Sektörün çok kısa sürede ulaştığı üretim ve buna bağlı ihracat artışı, beraberinde ciddi ve birikmiş sorunları da gündeme taşımaya başlamıştır. Bunların en önemlilerinden birisi de, işlenen malzemenin özelliklerine ve ürün tipine bağlı olarak farklı boyut ve miktarlarda açığa çıkan artıklardır.

Günümüzde doğal taş endüstrisinin geliştiği ülkelerde, diğer artıklar gibi mermer ya da doğal taş artıkları da çevresel bir sorun olarak kabul edilmektedir. Son on yıl içerisinde İtalya, İspanya, Yunanistan, Brezilya ve Hindistan'ın yanı sıra Türkiye'deki mermer ocak ve işleme tesislerinde üretim sonucu açığa çıkan artıklara yönelik toplum baskısı her geçen gün artmaktadır (Karaca, 2009). Ayrıca, mermer artıklarının uygun şartlarda depolanacağı alanlar da gittikçe daralmaktadır. Diğer yandan, ülkemizin 23 Ocak 2003 tarihinde üyeliğe kabul edildiği AB-Avrupa Çevre Ajansının uyguladığı çevre ve atıklarla ilgili stratejilere uymak zorunluluğu da bulunmaktadır. Uyum süreci ve Çevre Ajansına olan üyeliğimizin bir gereği olarak, sektörün geri dönüşüm stratejilerini uygulamak ve hayata geçirmek gibi görevleri bulunmaktadır. Bu durum karşısında, söz konusu artıkların çeşitli sektörlerde kullanılabilir şekilde endüstriye yeniden kazandırılması

çevresel, ekonomik, sosyal ve pratik en önemli çözüm yollarından birisi olarak görülmektedir.

Karbonatlı kayaçlar, kullanım alanları ve miktarları göz önüne alındığında, modern günlük yaşamın vazgeçilemez hammadde kaynakları olarak tanımlanabilir. Karbonatlı kayaçların ana minerali kalsit olup, kimyasal yapısı CaCO<sub>3</sub>'tür; camı parlaklıkta, renksiz saydam yapıdadır; sertliği Mohs skalasına göre 3, yoğunluğu ise 2,6-2,7 gr/cm<sup>3</sup> civarındadır. Dünyada kalsit adı altında tüketilen karbonatlı kayaçlar; kalsit (kristalin CaCO<sub>3</sub>), kireçtaşları (sedimanter), mermer (metamorfik) ve tebeşir (sedimanter, fosilli)'dir. Kalsit olarak adlandırılan kristalin CaCO<sub>3</sub>, dünya pigment pazarında çok az miktarda tüketilmekte olup, esas tüketim alanı bulan kalsiyum karbonat oluşumları; tebeşir, beyaz renkli saf kireç taşları ve iri kristalli mermerlerdir. Tebeşir, zayıf dayanım ve düşük beyazlığa sahip bir sedimanter kayaçtır. Kireçtaşı tebeşirden daha sert olup, beyazlığı daha yüksek (≥%95) bir kalsiyum karbonattır (Foto 1). Beyaz mermerin özellikle iri kristalli olanları yüksek saflıkta olup, beyazlık değeri %98'in üzerindedir. Sahip olduğu bu ve benzer özellikleri nedeniyle iri kristalli beyaz mermerlerden katma değeri yüksek ticari ürünler elde etmek mümkündür.

Günümüz pigment pazarında tüketim alanı bulan CaCO<sub>3</sub>; mikronize yani doğal öğütülmüş kalsiyum karbonat (GCC) ve sentetik yollarla elde edilen presipite yani çöktürülmüş kalsiyum karbonat (PCC)'dir (Foto 2).

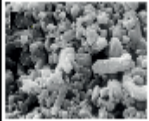
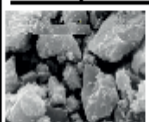
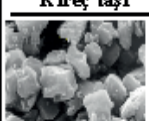
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Zayıf dayanımlı sedimanter kayaç</li><li>• Yaş: 80-110 milyon yıl</li></ul>	kristalin
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Güçlü dayanımlı sedimanter kayaç</li><li>• Yaş: 110-150 milyon yıl</li></ul>	kristalin
	<ul style="list-style-type: none"><li>• Metamorfik kayaç</li><li>• Yaş: 300-500 milyon yıl</li></ul>	kristalin

Foto 1. Doğal kalsiyum karbonatlar (Arnold, 1998; Kogler, 2000)

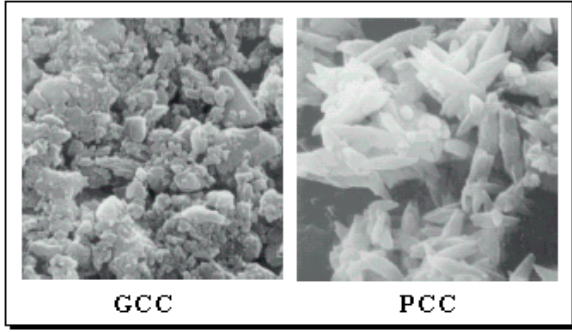


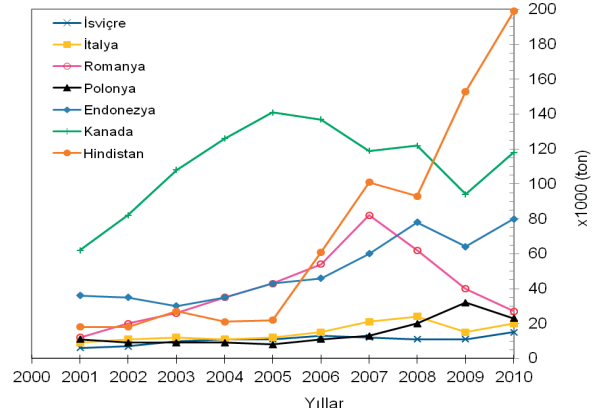
Foto 2. Doğal öğütülmüş (GCC) ve sentetik kalsiyum karbonat (PCC)'nin SEM görüntüleri

GCC'nin kullanım alanı, doğrudan doğruya hammaddenin özellikleri ile ilgili olup, tüketildiği yere göre farklılık gösterir. Ucuz olanlar asfalt, dolgu ve çimento; beyazlık ve parlaklığı %80'nin üzerinde ve orta büyüklükte tane boyuna sahip ara kalitedekiler macun ve mum üretiminde kullanılırlar. Safılık, %90'ın üzerindeki beyazlık derecesi, opaklık (opacity), tane boyutu ve dağılımı (APS: Average Particle Size & PSD: Particle Size Distribution), yüzey alanı, viskozite, su ve yağ absorpsiyonu, dökme yoğunluğuna da bağlı olarak ince ve çok ince tane boyutlu GCC; kağıt, boya, plastik ve kauçuk endüstrileri için gerçek anlamda işe yarar dolgu malzemeleridir.

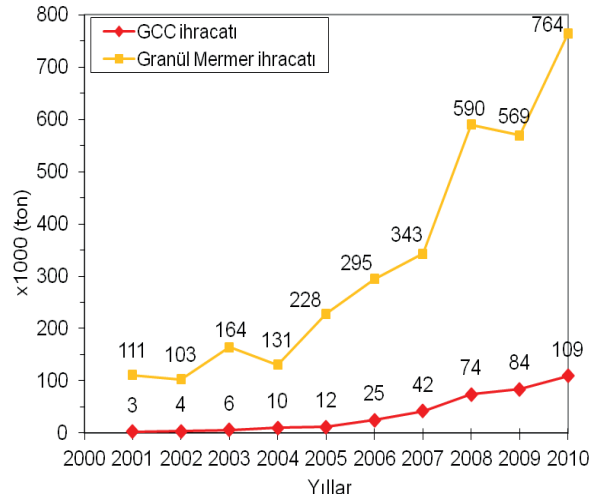
Boyutlarına (1-5 µm) ve beyazlık değerlerine (%92-98) bağlı olarak tüketildiği sektörler göre satış fiyatları farklılık gösteren global GCC üretim ve tüketim rakamları her geçen yıl artmaktadır. 2004 yılında 56,5 milyon ton olan GCC üretimi (Roskill, 2008) yıllık ortalama %4,5'lük bir büyümeyle 2011 yılında 74,3 milyon, 2015 yılı sonu itibarıyla da 81 milyon ton'a ulaşmıştır. Asya en önemli ve en hızlı büyüyen pazar olup, ulaştığı tonaj 41,7 milyon ton'dur (Roskill, 2016). GCC ithalatçısı Asya ülkeleri arasında Hindistan ve Endonezya başı çekmektedir (Şekil 1). İleriye dönük tahminler, global pazardaki üretim miktarının 2019 yılında 92 milyon ton olacağı yönündedir. Global pazarda görülen istikrarlı büyüme ülkemiz GCC ve granül mermer üretimine de yansımış 2001-2010 yılları arasında ihracat hızla yükselmiştir (Şekil 2).

Bu makalede ERMAŞ Mermer A.Ş. desteği ile TÜBİTAK-TEYDEB kapsamında gerçekleştirilen "Mermer Artıklarından Pigment Kalite Öğütülmüş Kalsiyum Karbonat (GCC) Üretimi" başlıklı projeden elde edilen verilerin; akademisyenler,

özel sektör temsilcileri ve yönetici çevreler ile paylaşılması amaçlanmaktadır. ERMAŞ Mermer A.Ş. tarafından *Muğla Beyazı* mermeri üretimi yapılan Yatağan Ocağı pasa sahasından alınan yüksek safılık ve beyazlık derecesine sahip mermer artıklarından birçok sektörde kullanım alanı bulabilen pigment kalite GCC üretimi için, karıştırmalı bilyalı değirmende gerçekleştirilen kuru ve yağ öğütme çalışmalarından elde edilen ürünlerin özelliklerine yer verilmiştir.



Şekil 1. Önemli GCC ithalatçı ülkeler (Roskill, 2012)



Şekil 2. Türkiye GCC ve granül mermer ihracatı (Roskill, 2012)

## 1. DENEYSEL

### 1.1. Malzeme ve Yöntem

Çalışmalarda kullanılan mermer artıkları, ERMAŞ Madencilik Turizm Sanayi Tic. A.Ş.'ye ait Muğla-Yatağan'da bulunan pasa stok sahaslarından

(Foto 3) alınmıştır. 3 ayrı sahada stoklanan mermer artığı miktarı yaklaşık 2800000 ton'dur. Numunelerin temsili olması açısından pasa sahalardan blok ve parça halinde alınan numunelerin blok olanları endüstriyel ölçekte kırıcılarda kırılarak diğer parça numunelerle paçal edilmiş, böylelikle tane boyutu 8-15 cm arasında değişen 200 kg numune temin edilmiştir.

Numune hazırlama işlemleri AKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiş, iki aşamalı kırma işleminden sonra karıştırmalı bilyalı değirmen için gerekli olan besleme boyutunda (< 2 mm) malzeme üretilmiştir.

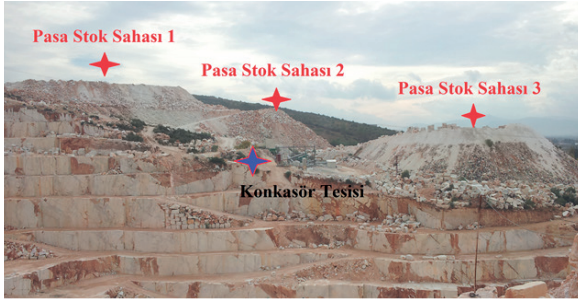


Foto 3. Numunelerin alındığı pasa stok sahaları

Muğla beyazı mermer artığının mineralojik-petrografik analizleri polarizan mikroskop ve XRD ile kimyasal analizleri ise düşük algılama limitli XRF tekniği ile tespit edilmiş, fiziksel özelliklerin belirlenmesinde boyut analizi, yoğunluk ve beyazlık yöntemleri kullanılmıştır. 38 µm'den iri tanelerin boyut dağılımı elek analizi yöntemiyle, daha küçük taneler ise nano boyuttan milimetre boyutuna çok geniş bir aralıkta ölçüm yapabilen lazer tane boyutu ölçüm cihazında belirlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri için helyum gazıyla hassas ölçüm yapan otomatik piknometre kullanılmış, optimum yaş/kuru öğütme ürünlerinin yağ emme testleri TS 2583 EN ISO 787-5 standardına göre yapılmıştır. Mermer artığının ve optimum yaş/kuru öğütme ürünlerinin beyazlık değerleri (CIE Whiteness; L değeri) Elprepho cihazında, özgül yüzey alanı ölçümleri ise Nova 2200e model BET özgül yüzey alanı ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir.

Yaş/kuru olarak yapılan öğütme deneylerinde; TFT-LCD kontrollü kullanıcı ara yüzü kontrol ünitesi (PLC kontrollü) ile devir hızı (D/D), motor

akımı (AMP), süre (dakika) ve tork (Nm) dijital olarak kontrol edilip izlenebilen karıştırmalı bilyalı değirmen (Foto 4) kullanılmıştır. Öğütme işleminin gerçekleştiği su soğutmalı haznenin net hacmi 1400 ml olup, pinli ve diskli şaftların özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



Foto 4. Karıştırmalı bilyalı değirmen

Çizelge 1. Kullanılan şaftlar ve özellikleri

Şaft Tipi	 Pinli
Hacim	50 ml
Çalışma Tipi	Kuru
Karıştırma Hızı	Maksimum 600 D/D
Çapı	73 mm
Şaft Tipi	 Diskli
Hacim	150 ml
Çalışma Tipi	Yaş
Karıştırma Hızı	Maksimum 2500 D/D
Çapı	70 mm

Karıştırmalı bilyalı değirmende gerçekleştirilen yaş/kuru öğütme deneylerinde alümina/seryum stabilize boncuklar kullanılmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2. Boncukların özellikleri

Boncuk Tipi	Alümina/Seryum	
Boncuk Çapı (mm)	2	5
Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	3,5	3,5
Boşluk Hacmi (%)	40	45
Yığın Yoğunluğu (gr/cm <sup>3</sup> )	2,39	2,31
Sertlik (Hv)	1350	1350

Yaş öğütme deneyleri, polimerik bir dispersan ile gerçekleştirilmiştir.

Öğütme esnasında tüketilen enerji Voltcraft Energy Check 3000 model enerji ölçer ile ölçülmüş, veriler son değer okunarak kaydedilmiştir.

Karıştırmalı değirmenlerde öğütmenin gerçekleşmesi iki koşula bağlıdır. Bunlar, değirmen içinde birim zamanda meydana gelen çarpışma sayısı ve her çarpışmada açığa çıkan enerji miktarıdır. Yaş öğütmede değirmen içinde oluşacak olan stres şiddeti (SI) Eşitlik 1’de verilen denklem ile belirlenebilmektedir (Dikmen ve Ergün, 2004; Kwade, 1999).

$$SI = D_m^3 (p_m - p) V_1^2 \quad (1)$$

Burada;  $D_m$ : öğütücü ortam boyutu (m);  $p_m$ : öğütme ortam yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>);  $p$ : pülp yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>);  $V_1$ : karıştırıcı çevresel hızı (m/s).

OMYA firması tarafından geliştirilen ve son yıllarda kullanılmaya başlayan bir diğer kalite parametresi de diklik faktörü’dür (Stepness Factor: SF). Ürünün eş boyutlu tane oranı anlamına gelen diklik faktörü hesabında, Eşitlik 2’de verilen denklem kullanılmıştır.

$$100 \times (d_{30}/d_{70}) \quad (2)$$

Çizelge 4. Kireçtaşlarının saflık sınıflaması (Industrial Minerals, 2011)

CaCO <sub>3</sub> Sınıflaması	CaO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
%100 Kireçtaşı	56,00	100,0	-	-	-
Çok yüksek saflık	>55,2	>98,5	<0,8	<0,2	<0,05
Yüksek saflık	54,3-55,2	97,0-98,5	<1,0	<0,6	<0,1
Orta düzey saflık	52,4-54,3	93,5-97,0	<3,0	<1,0	<1,0
Düşük saflık	47,6-52,4	85,0-93,5	>3,0	<2,0	>1,0
Kirli, karışık	<47,6	<85,0	-	>2,0	-

## 2. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 2.1. Karakterizasyon

Tamamı 2 mm altına ufalanan Muğla beyazı mermer artıklarının ortalama tane boyutu 500 µm olup, nem ve yoğunluk değerleri sırasıyla %0,38 ve 2,62 gr/cm<sup>3</sup>’dür.

Kalsiyum karbonatların (CaCO<sub>3</sub>) kullanım alanını, doğrudan doğruya hammaddenin özellikleri belirlemektedir. Saflık, beyazlık ve tane boyu dağılımı en önemli özelliklerdendir. Saf olanlarının bileşiminde %56 CaO, %44 CO<sub>2</sub> ve birlikte bulunduğu kayaç ve minerallere bağlı olarak az da olsa Mg, Fe, Mn, Zn, Sr, Cu, Pb, Co, Ba, Cr ve As bulunabilir. Söz konusu safsızlıklar esas itibarıyla MgO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> olup, kullanıldığı sektöre göre kaliteyi olumsuz etkilemektedir. Bu bakış açısıyla, Muğla beyazı mermer artığının Çizelge 3’te sunulan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4’te verilen CaCO<sub>3</sub> saflık sınıflaması dikkate alınarak değerlendirildiğinde Muğla beyazı mermer artıklarının “çok yüksek saflıkta” kalsiyum karbonatlar (CaCO<sub>3</sub>) sınıfında yer aldığı anlaşılmaktadır.

Nitekim, bu durumu mineralojik analiz (XRD) sonuçları da teyit etmektedir. Foto 5’de verilen yarı kantitatif XRD analizinden de görüleceği gibi, hakim pik kalsit olup, oranı %98’dir; kuvars oranı ise %2 civarındadır.

Çizelge 3. Muğla Beyazı mermer artığının kimyasal analizi

	CaO (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Muğla Beyazı mermer	55,40	98,93	0,24	0,18	0,02



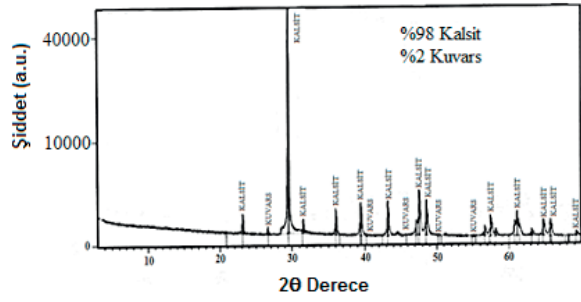


Foto 5. Muğla Beyazı mermer artığının XRD analizi

Renk, GCC'nin ihtiva ettiği safsızlıklar için bir ölçüdür. Beyazlık değeri; kağıt, plastik ve/veya boya endüstrisinde dolgu maddesi ve pigment olarak kullanılan GCC için önem arz etmekte ve beyazlık aralığının %75-98 arasında olması istenmektedir. Pasa sahasında alınıp boyutu 2 mm altına ufalanan mermer artıklarının Elprepho cihazında yapılan beyazlık ölçümü sonucu elde edilen beyazlık değeri (L değeri) yüksek olup %98,15'dir. Yüzey alanı ve yağ emme değerleri ise sırasıyla 0,227 m<sup>2</sup>/g ve 11 ml/100 g'dır.

Polarizan mikroskop görüntüsü Foto 6'da verilen Muğla beyazı mermeri, iri, eş boyutlu ve polisentetik ikizlenme gösteren birbirine kenetlenmiş kalsit kristallerinden oluşmakta ve granoblastik doku sergilemektedir. Kalsit kristallerinin maksimum tane boyutu 4,7 mm, minimum tane boyutu 168,1 µm ve ortalama tane boyutu ise 1,038 mm'dir. Muğla Beyazı mermeri kalsit kristallerinin tane sınırları düz ve iri tane boyutuna sahip olduğu için kolay öğütülebilir özellik göstermektedir (Türkmen ve Çalapkulu 1999). Öğütülebilirlik ile malzemenin sertlik değeri arasında bir ilişki vardır. Çelik vd. (2011)'ne göre Muğla beyazının Knoop sertlik değeri 135 HK, Mohs sertlik değeri ise 3 olup, kalsite eşdeğerdir.

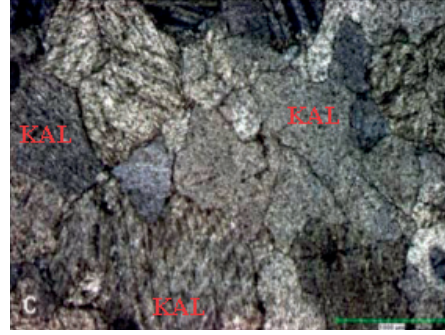


Foto 6. Muğla Beyazı mermerin polarizan mikroskop görüntüsü

## 2.2. Öğütme

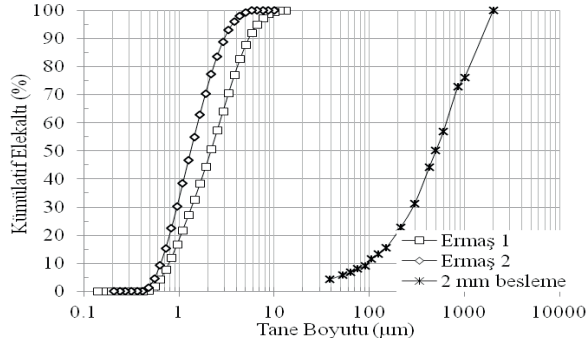
Karıştırmalı bilyalı değirmende gerçekleştirilen yaş/kuru öğütme sonucunda optimum şartlarda elde edilen GCC ürünlerinin boyut dağılımları Şekil 3'te verilmiştir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi; en küçük ebat ve dar boyut aralığında GCC ürünleri, yaş öğütme sonucu elde edilmiştir. Yaş öğütme ürünlerinin (Ermaş 1 ve Ermaş 2) diklik faktörü ve spesifik enerji tüketimleri kuru öğütme ürününe (Ermaş 3) nazaran daha yüksektir. Kuru öğütmede 5,2 µm'den daha ince boyutlara inilmek istendiğinde, ince taneler hızla topaklanmakta, öğütücü ortamla temas kesilerek yastıklanma etkisi meydana geldiğinden aşırı enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu durum, ekonomik öğütme sınırını ve kapasiteyi kısıtlamaktadır. Yaş öğütmede dispersan varlığında, benzer enerji tüketimi ile, dispersansız öğütme ortamına nazaran daha dar boyut aralığında ve daha düşük ortalama tane boyutuna sahip GCC üretmek mümkün olabilmektedir (Çizelge 5).

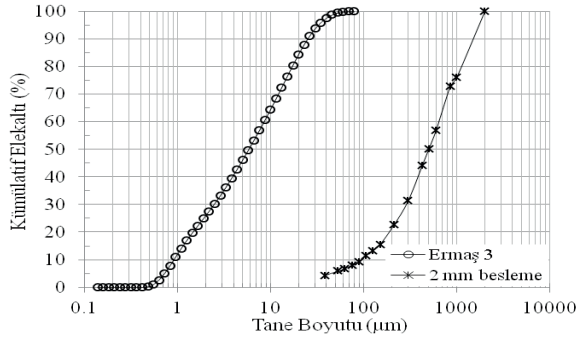
Çizelge 5. Yaş/kuru öğütme değişkenlerine ait veriler

Ürünler (mm)	Besleme Boyutu (d <sub>98</sub> ) (mm)	Ürün (d <sub>50</sub> ) (µm)	SI (10 <sup>-3</sup> Nm)	Diklik Faktörü (%)	Spesifik Enerji (kWh/t)	Dispersan	
Yaş	Ermaş 1	2	1,3	0,3356	47,37	318	+
	Ermaş 2	2	2,1	1,1324	39,39	318	-
Kuru	Ermaş 3	2	5,2	-	21,00	284	-

Muğla beyazı mermer artıklarının karıştırmalı bilyalı değirmende yaş öğütülmesinde yüksek öğütme süreleri, viskozite artışlarına neden olduğundan dar tane boyutunda ürün elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Artan viskozite ile tanelerin topaklanmasını önlemek, dolayısıyla da etkin bir öğütme işlemi gerçekleştirmek için dispersan kullanmak gerekmektedir (Koltka vd., 2013).



(a)



(b)

Şekil 3. Optimum şartlarda elde edilen yaş (a) ve kuru (b) öğütme ürünlerinin boyut dağılım eğrileri

Çizelge 5'de görüldüğü gibi, dispersan kullanımı ile viskozite düşerken buna bağlı olarak stress şiddeti artmakta ve aynı spesifik enerji tüketimi ile daha küçük tane boyutunda GCC ürünü elde edilebilmektedir. %90'ı 52 µm altında yer alan Marmara mermerlerinin karıştırmalı bilyalı değirmende yaş öğütülmesi ile ilgili olarak yapılan bir çalışmada (Tamblyn 2009); %94'ü 2 µm altında GCC ürünü elde etmek için 200 kWh/t, 1 µm altında ürün için ise 300 kWh/t enerji tüketilmiştir.

Muğla beyazı mermer artıklarının karıştırmalı bilyalı değirmende yaş/kuru olarak mikronize

boyutta optimum şartlarda (Çizelge 6) öğütülmesi sonucunda, kâğıttan boyaya, plastikten gıda, yapı, ilaç ve kozmetiğe vs. birçok alanda kullanılacak özellikte pigment kalite GCC ürünleri elde edilmiştir (Çizelge 7). Ermaş 1 ve 2 olarak adlandırılan GCC ürünlerinin katma değerleri yüksek olup, kağıt kaplama, plastik, boya vs. sektörlerin ihtiyaçlarını karşılayacak nitelik ve kalitededir. Ermaş 3 ise kağıt dolgu, plastik ve kauçuk kalite bir üründür. Söz konusu GCC ürünleri, dünya standartlarına uygun nitelik ve kalitede olup, dünya ve/veya Avrupa pazarına hakim olan Omya, Imerys, Calcite gibi büyük GCC üretici firmaların halen ürün portföyünde olan ürünlere (Çizelge 8) eşdeğer düzeyde ve hatta beyazlık açısından onlardan daha üstün niteliğe sahiptir. Ocağın/stok sahalarının en yakın limana olan uzaklığı (75 km) dikkate alındığında, üretilen GCC'nin ihracat potansiyeli ve uluslararası pazarlarda rekabet gücü yüksektir.

### 3. SONUÇLAR

ERMAŞ Mermer A.Ş.'nin *Muğla Beyazı* mermeri üretimi yaptığı Muğla-Yatağan Ocağı pasa sahasından alınan mermer artıkları; kimyasal analiz verileri ve CaCO<sub>3</sub> saflık sınıflaması dikkate alınarak yapılan sınıflandırmaya göre "çok yüksek saflıkta" kalsiyum karbonatlar (CaCO<sub>3</sub>) grubunda yer almaktadır. Bunu teyit eden XRD sonucuna göre hakim pik kalsit olup, oranı %98'dir; kuvars ise %2 oranında bulunmaktadır.

Söz konusu artıkların yüksek beyazlık (L değeri), yüzey alanı, kimyasal analiz ve düşük yağ emme değerlerinin Avrupa'da ve ABD'de satışa sunulan GCC'lere nazaran daha elverişli/rekabet edebilecek düzeyde ve ince-orta taneli kristalin yapısı ile kolay öğütülebilir olması, dış pazarlarda alıcı bulması olasılığını artırmaktadır. Üretilen GCC'nin, bu yönüyle yöredeki firmalar için yeni ve rekabetçi bir ürün olma potansiyeli yüksektir.

Muğla Beyazı mermeri artıklarından global pazarda alıcı bulan GCC özelliklerine eşdeğer düzeyde ve hatta onlardan daha üstün kalitede GCC üretimi, herhangi bir zenginleştirme işlemine başvurmadan yapılacak verimli-kontrollü bir öğütme (yaş veya kuru) ve etkin bir sınıflandırma ile mümkündür.

Öğütme şartlarının optimizasyonu için yapılan yaş/kuru öğütme çalışmalarında en küçük ebat ve dar boyut aralığında GCC ürünlerine, diskli shaftın kullanıldığı yaş öğütme deneyleri sonucunda ulaşılmıştır. Yaş öğütme sonucu elde edilen ürünlerin (Ermaş 1 ve Ermaş 2) diklik faktörü ve spesifik enerji tüketimleri kuru öğütme ürününe (Ermaş 3) nazaran daha yüksektir. Kuru öğütmede 5,2  $\mu\text{m}$ 'den daha ince boyutlara inmek, topaklanma ve yastıklanma etkisi ile mümkün olmamakta, bu durum spesifik enerji tüketimini

arttırarak ekonomik öğütme sınırını ve kapasiteyi kısıtlamaktadır. *Muğla Beyazı* mermeri artıklarının karıştırmalı bilyalı değirmende yaş öğütülmesinde yüksek öğütme süreleri, viskozite artışlarına neden olduğundan dar tane boyutunda ürün elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Düşük enerji tüketimi ile ortalama tane boyutu ( $d_{50}$ ) 2  $\mu\text{m}$ 'nin altında ve dar bir boyut aralığında GCC üretimi, ancak yaş öğütme şartlarında ve dispersan varlığında mümkün olabilmektedir.

Çizelge 6. Optimum öğütme parametreleri

Ürün	Öğütme Süresi (dak)	Karıştırma Hızı (D/D)	Bilya Şarjı (%)	Pülp Katı Oranı (%)	Boncuk Çapı (mm)	Dispersan Dozajı (%)
Ermaş 1	30	1200	70	70	2	0,4
Ermaş 2	30	1200	70	70	2	-
Ermaş 3	60	350	70	30	5	-

Çizelge 7. Optimum öğütme şartlarında elde edilen GCC karakteristikleri

Ürün	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Beyazlık (%)	BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Yağ Emme ( $\text{ml}/100\text{g}$ )	Kağıt	Boya	Plastik	Kauçuk	Macun
Yaş	Ermaş 1	1,3	99,05	11,06	40	x	x	x	
	Ermaş 2	2,1	99,04	3,98	30	x	x	x	
Kuru	Ermaş 3	5,2	99,05	2,14	16	x	x	x	x

Çizelge 8. Optimum öğütme şartlarında elde edilen GCC ürünlerinin ticari ürünlerle karşılaştırılması

	ERMAŞ MADENCİLİK			OMYA	IMERYYS	CALCITE	
	Ermaş 1	Ermaş 2	Ermaş 3	Hydrocarb 60	Carbital 110	Calplex 1	Calplex 2
$\text{CaCO}_3$	%98,9	%98,9	%98,9	%98	%98	%98	%98
$d_{98}\%$ ( $\mu\text{m}$ )	4,3	8,3	11,4	-	-	6,0	7,5
$d_{50}\%$ ( $\mu\text{m}$ )	1,3	2,1	5,2	1,4	2,0	1,4-1,8	2,0-2,6
Beyazlık (L)	99,05	99,04	99,04	-	95 $\pm$ 1,5	96	95
Refraktif index	-	-	-	0,97	-	-	-
Sarılık	0,53	0,53	0,54	-	-	<2,0	<2,0
R457	97,56	97,54	97,55	-	95	95	94
Özgül Yüzey Alanı ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	11,06	3,98	2,14	7	5	6,34	4,87
Yağ Emme (DOP) ( $\text{ml}/100\text{g}$ )	40	30	16	-	18	31g/100g	30g/100g

Estetik görünüm kadar ekolojik açıdan da kirlilik oluşturan bu artıklardan, enerji dostu karıştırılabilir bilyalı değirmen kullanarak düşük üretim maliyetleri ile katma değeri yüksek GCC ürünleri elde etmek mümkündür. Bununla çevresel riskler/maliyetler de azalacağından aynı zamanda çevre dostu bir uygulamadır.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, 3120546 no'lu TÜBİTAK-TEYDEB projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

## KAYNAKLAR

Arnold, M., 1998. Natürliches Calciumcarbonat in gestrichenem Papier und Karton. 12. Internationale Konferenz der Papierindustrie, Cesky Krumlov-Tschechien.

Çelik, M. Y., Yeşilkaya, L., Ersoy, M., Turgut, T., 2011. Karbonat Kökenli Doğaltaşlarda Tane Boyu ile Knoop Sertlik Değeri Arasındaki İlişkinin İncelenmesi. *Madencilik*, 50 (2), 29-40.

Dikmen, S., Ergün, Ş.L., 2004. Karıştırılabilir Bilyalı Değirmenler. *Madencilik*, 43 (4), 3-15.

Industrial Minerals, 2011. High Purity Limestone Quest., 48-52.

Karaca, Z., 2009. Doğaltaş Endüstrisi ve Çevre. Mermer Artıklarının Değerlendirilmesi ve Çevresel Etkilerinin Araştırılması Sempozyumu, Editörler: Ayhan, M., Karakuş, A., Özdemir, M., Diyarbakır, 325-337.

Kogler, W., 2000. Streichpigmente unter dem Aspect gegenwärtiger und zukünftiger Anwendungen. Streichereifachtagung, Boppart-Deutschland.

Koltka, S., Güvercin, S., Ekelik, T., Özdemir, O., Sabah, E., 2013. The Dispersion Properties of Micronized Marble Suspensions in the Presence of Inorganic and Polymeric Dispersants. *International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition*. Editörler: Özdemir, S.K., Polat, M., Tanoğlu, M. Çeşme-Turkey, 686-692.

Kwade, A., 1999. Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and Its Practical Application. *Powder Technology*, 105, 14-20.

Roskill, 2008. The Economics of Ground Calcium Carbonate. Roskill Report, 3rd edition, London, 327 p.

Roskill, 2012. Ground & Precipitated Calcium Carbonate: Global Industry, Markets & Outlook. Roskill Report, 1st edition, London, 366 p.

Roskill, 2016. Ground & Precipitated Calcium Carbonate: Global Industry, Markets & Outlook. Roskill Report, 2st edition, London, 347 p.

Tamblyn, R. J., 2009. Analysis of Energy Requirements in Stirred Media Mills. Doctor Thesis, The University of Birmingham School of Chemical Engineering College of Engineering and Physical Sciences, 178.

TC Ekonomi Bakanlığı, 2016. Doğal Taş Sektörü. İhracat Genel Müdürlüğü Maden, Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, Ankara, 6.

TS 2583 EN ISO 787-5, 1997. Pigment ve Dolgu Maddeleri İçin Genel Deney Metotları - Yağ Absorplama Değerinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Bölüm 5.

Türkmen, F., Çalapkulu, F., 1999. Muğla Yöresi Mermerleri. 52. Türkiye Jeoloji Kurultayı. Ankara, 39-46.





Orijinal Araştırma / Original Research

## KAYAÇLARIN AŞINDIRICILIKLARININ ÜÇ FARKLI DENEY YÖNTEMİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

DETERMINATION OF ABRASIVENESS OF ROCKS WITH THREE DIFFERENT TEST METHODS

Olgay Yaralı<sup>a,\*</sup>, Hamit Aydın<sup>a</sup>, Utku Sakı<sup>a</sup>, Haşim Duru<sup>a</sup>, Servet Bulut<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 2 Ekim / October 2017  
Kabul Tarihi / Accepted : 8 Aralık / December 2017

### ÖZ

**Anahtar Sözcükler:**  
Aşınma,  
Cerchar aşınma indeksi,  
Norveç aşınma indeksi,  
Schimazek aşınma indeksi.

Mekanik kazı makinelerinden beklenen yararları ulaşabilmek için bu makinelerin kazılacak kayaçların özelliklerine uygun olarak seçilmeleri gerekmektedir. Yüksek aşındırıcılık özelliğine sahip kayaçlar, kısa zamanda keskinin körlenmesine neden olmaktadır. Bu durum, bir yandan keski tüketimini artırmakta, diğer yandan kazı verimini düşürmekte ve dolayısı ile kazı maliyetinin artmasına yol açmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Zonguldak Bölgesi magmatik ve sedimanter olmak üzere 9 farklı kayaç türü üzerinde Cerchar aşınma indeksi (CAI), Norveç aşınma (AV) indeksi deneyleri ile Schimazek aşınma (F) indekslerine göre aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Üç farklı aşınma deney yönteminden elde edilen sonuçlar basit regresyon analiziyle birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Schimazek aşınma indeksi deneyi ile Cerchar aşınma indeksi ve Norveç aşınma indeksi deneyi arasında doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlara göre incelenen kayaçların aşındırıcı ve oldukça fazla aşındırıcı oldukları bulunmuştur.

### ABSTRACT

**Keywords:**  
Abrasive,  
Cerchar abrasivity index,  
Abrasion Value,  
Schimazek wear index

In order to achieve the expected benefits from mechanical excavation machines, these machines must be selected in accordance with the characteristics of the excavated rocks. Highly abrasive Rocks cause fast cutter wear in short time. This increases the chisel consumption in excavation and reduces the efficiency, and thus increases in excavation cost.

In this study, Cerchar abrasiveness index (CAI), abrasion value (AV) and Schimazek wear index (F) tests were carried out on 9 igneous and sedimentary rocks samples from Zonguldak Region. The results then evaluated with regression analysis to determine the relationship between different abrasion index values. According to the test results, rocks were classified as abrasive and extremely abrasive. The statistical analysis showed strong linear relationships between Schimazek wear index - Cerchar abrasiveness index, and Schimazek wear index - abrasion value.

\* Sorumlu yazar: oyarali67@gmail.com \* <https://orcid.org/0000-0003-4965-0330>  
\*\* haydin69@hotmail.com \* <https://orcid.org/0000-0003-2165-5869>  
\*\*\* utkusakiz@beun.edu.tr \* <https://orcid.org/0000-0002-7246-0714>  
\*\*\*\* hasimduru@beun.edu.tr \* <https://orcid.org/0000-0002-2001-3816>  
\*\*\*\* servet.bulut@hotmail.com \* <https://orcid.org/0000-0002-5142-5653>

## GİRİŞ

Ülkemizde ve Dünya’da madencilik ve inşaat uygulamalarında, özellikle tünel ve galeri açma işlerinde mekanize kazı araçlarının (elektro hidrolik deliciler, jumbolar, kollu galeri açma makineleri, tam cephe galeri açma makineleri vb.) kullanımı gittikçe artmaktadır. Dolayısıyla, ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve hemen hemen tümüyle ithal edilen kazı makinelerinin, kayaç özelliklerine göre seçilmesi önemli olmaktadır. Makine seçimini ve performansı, kazı makinasının özelliklerine ve kazılacak kayacın fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlıdır (Fowell ve Johnson, 1982; Farmer ve Garrity, 1987; Bilgin, 1989; Rostami ve Özdemir, 1994; Thuro ve Plinninger, 1999; Alvarez vd, 2003; Bilgin vd., 2005; Yaralı, 2010; Çopur vd, 2011; Ersoy ve Balcı, 2013). Ülkemizde kazı makinası (TBM, jumbo, kollu galeri açma makinası, vb.) performansını belirlemeye yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır (Balcı, 2004; Akün ve

Karpuz, 2005; Kahraman vd, 2006; Balcı vd, 2007; Çopur vd, 2011; Bilgin vd, 2012; Özaydın vd, 2013; Kahraman ve Kahraman 2013; Çapık vd, 2013; Su vd, 2013; Yaralı ve Soyer, 2013; Ateş vd, 2014; Çopur vd, 2014; Ökten vd., 2014).

Ancak ilk yatırım maliyeti ve kesici uç tüketiminin çok yüksek olan ve hemen tümüyle ithal edilen bu makinelerin, kayaç özelliklerine uygun şekilde seçilmesi çok önemlidir. Çünkü mekanize kazıda iyi performans elde etmek için kazı yapılacak kayaç formasyonun fiziksel, mekanik ve indeks özelliklerinin yanında mineralojik-petrografik özelliklerinin de bilinmesi ve ne kadar keski harcanacağı tahmin edilerek makina tipinin iyi tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun tersi yönünde makinenin yanlış seçimi ve keski tüketiminin yanlış belirlenmesi kazı maliyetlerinin artmasına neden olacaktır (Bilgin, 1989; Bilgin vd., 2005; Bilgin vd., 2010; Yaralı, 2010; Bilgin vd., 2012). Makine seçimini ve performansını etkileyen faktörler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Kazı makinelerinin performansını etkileyen bazı parametreler (Çopur vd, 1997, Bulut’dan, 2017)

Makine Özelliklerine Bağlı Parametreler	Jeolojik Parametreler	İşletmeye Bağlı Parametreler
<p><u>Makine Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Makinenin tipi</li> <li>• Makinenin ağırlığı ve boyutları</li> <li>• Pasa toplama ve taşıma kapasitesi</li> <li>• Makinenin yaşı</li> <li>• Makinenin kurulu toplam gücü</li> </ul>	<p><u>Kaya Kütlesi Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaya kalite değeri (RQD)</li> <li>• Kaya kütlesi sınıflama sistemi (RMR)</li> <li>• Jeolojik süreksizlikler</li> <li>• Hidrojeolojik durum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>İş organizasyonu</li> <li>Lojistik destek</li> <li>Havalandırma</li> <li>Nakliyat</li> <li>Ekipman temini</li> <li>Kalifiye işçilik</li> <li>Finansman</li> </ul>
<p><u>Kesici Kafa Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kesici kafanın tipi ve boyutu</li> <li>• Kesici kafanın gücü</li> <li>• Keskinin dağılımı ve sayısı</li> <li>• Keski tipi ve özellikleri</li> </ul>	<p><u>Kayacın Fiziksel ve Mekanik Özellikleri</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaya kesme parametreleri (<i>Spesifik enerji, kesme kuvvetleri</i>)</li> <li>• Dayanım özellikleri (<i>Basınç ve çekme dayanımı, kohezyon, elastik değeri</i>)</li> <li>• Yüzey sertliği (<i>Shore ve Schmidt çekici değeri</i>)</li> <li>• Fiziksel özellikler (<i>Porozite, yoğunluk, su içeriği, nem oranı vb.</i>)</li> <li>• Petrografik özellikler (<i>aşındırıcı mineral içeriği, kuvars içeriği, kuvars tane boyutu, mineral tane boyutu, çimento türü, çimentolanma derecesi, tane yönlenmesi</i>)</li> <li>• Aşındırıcılığı (<i>Cerchar aşınma indeksi</i>)</li> </ul>	

Mekanize kazı makinalarının seçilmesinden önce, gerekli olan kesme veya delme enerjisi ile keski tüketimi miktarına bağlı olan kazı performansının önceden doğru tahmin edilmesi kritik aşamadır. Kayaçların aşındırıcılıklarının belirlenmesi ve keski tüketimini önceden tahmin etmek amacıyla birkaç deney yöntemi geliştirilmiştir (Özdemir ve Nilsen, 1999; Büchi vd, 1995; Dahl, 2003). Bu deneyler;

1. Cerchar aşınma indeks deneyi (CAI)
2. Norveç aşınma indeks deneyi (AV)
3. Keski ömrü indeks deneyi (CLI)
4. Uç aşınma indeks deneyi (BWI)
5. LCPC aşınma deneyi (ABR)

Bu deneyler için özel ekipmanlar gerekmektedir. Bu deneyler sonucunda elde edilen değerlere bağlı olarak, kayaca uygun mekanize kazı makinası tipi ve makina performansı (ilerleme oranı, keski ve enerji tüketim miktarı) belirlenebilmektedir. Ülkemizde ve Dünya'da son yıllarda özellikle Avrupa'da (Almanya, İngiltere, Fransa vb.), Avustralya ve Kuzey Amerika'da Cerchar aşınma indeks, Norveç aşınma deneyi, keski ömrü indeks deneyi, uç aşınma indeks deneyleri kayaçların aşındırıcılıklarının ve keski ömrünün doğru olarak belirlenmesinde kullanılan yaygın deney yöntemleri haline gelmiştir. Bu deney yöntemleri tam cephe ve kollu galeri açma makinaları için kullanılan tahmin modellerinde önemli bir rol oynamaktadır (Bilgin vd, 1988; Wijik, 1992; Özdemir ve Nilsen, 1999; Rostami vd, 2005; Kasling ve Thuro, 2010).

Bu çalışmanın amacı, Zonguldak Bölgesi'nde yerüstü mühendislik yapılarında karşılaşılan kireçtaşı ve andezit kayaç türlerinin aşındırıcılık değerlerinin ve sınıfının, farklı aşınma deneyleri ile belirlemektir. Bu amaçla, Zonguldak Bölgesi'nin değişik yerlerinden 4 adet kireçtaşı, 5 adet de andezit örnekleri üzerinde 3 farklı aşınma deney yöntemi (Cerchar aşınma indeksi, Norveç aşınma indeksi, Schimazek aşınma indeksi) ile aşındırıcılık deneyleri yapılmıştır. Schimazek aşınma indeksi belirlemek için incelenen kayaçların dolaylı çekme dayanımları (Brazilian) ile petrografik analizler (ortalama aşındırıcı mineral tane boyutu, eşdeğer kuvars içeriği) yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar basit regresyon analiziyle değerlendirilmiş ve bu üç farklı deney yöntemleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

## 1. AŞINMA DENEY YÖNTEMLERİ

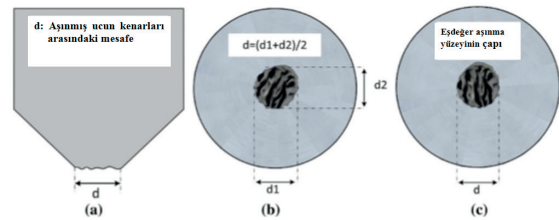
### 1.1. Cerchar Aşınma İndeks Deneyi (CAI)

Cerchar aşınma indeks deneyi kayaçların aşındırıcılıklarının ve keski ömrünün doğru olarak belirlenmesinde kullanılan yaygın bir deney yöntemi haline gelmiştir. Ayrıca, Cerchar aşınma indeks deneyi tam cephe ve kollu galeri açma makinaları için kullanılan tahmin modellerinde de önemli bir rol oynamaktadır. (Özdemir vd, 1991; Wijik, 1992; Rostami vd, 1994; Rostami vd, 1996; Bilgin vd, 2005; Kasling ve Thuro, 2010).

Cerchar aşınma indeksi deneyi kömür madenciliği uygulamaları için ilk olarak Fransa'da Cerchar Araştırma Enstitüsü (Research Institute Cerchar of the Charbonnages de France)'nde 1971 yılında bulunmuş ve sonuçlar Valantin (1973) tarafından yayınlanmıştır. Bu deney, kayaçların aşındırıcılığının belirlenmesinde ve mekanize kazı makinalarının keski tüketiminin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır (Plinninger vd, 2003; Plinninger vd, 2004; Rostami vd, 2005; Yaralı ve Duru, 2016).

ISRM (2015), Cerchar aşınma indeks deneyini, birinci nesil (klasik) deney aleti için  $1 \pm 0,5$  saniye, ikinci nesil (West) deney aleti için  $10 \pm 2$  saniye boyunca ve 70 N'luk statik yük altında, 2000 N/mm<sup>2</sup> çekme dayanımına sahip standart krom vanadyum alaşımli soğuk iş takım çeliğinden üretilmiş Rockwell Sertliği HRC55 $\pm$ 1 olan ve 90° tepe açılı konik bir ucun taze kırılmış bir kayaç yüzeyinde 10 mm çekilmesi şeklinde gerçekleştirilen deney yöntemi olarak tarif etmiştir.

Bu deney her seferinde yeni uçlar kullanılarak farklı yönlerde en az beş kez tekrarlanır. Bu deney iki deney aletinden biri kullanılarak yapılır. Cerchar aşınma indeks deneyinde kullanılan konik uç, mikroskop altında incelenerek uçtaki aşınma yüzeyinin çapı (d) 0.1 (1/10) mm hassasiyetinde yatay ve düşey konumda ölçülür (Şekil 1). Tespit edilen aşınma miktarı kayacın aşındırıcılığı olarak kabul edilir. ISRM (2015) göre CAI için aşındırıcılık sınıflaması Çizelge 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Yatay okuma (a), düşey okuma (b,c) (ISRM, 2015)



Çizelge 2. Pürüzlü yüzeyler için Cerchar aşınma indeks sınıflaması (ISRM, 2015)

Sınıfı	CAI Değeri
Aşırı düşük	0.1 – 0.4
Çok düşük	0.5 – 0.9
Düşük	1.0 – 1.9
Orta aşındırıcı	2.0 – 2.9
Yüksek	3.0 – 3.9
Çok Yüksek	4.0 – 4.9
Aşırı yüksek	≥ 5

## 1.2. Schimazek Aşınma İndeks Deneyi (F)

Schimazek aşınma indeksi (F) bir disk keski kullanılarak sedimanter kayalar üzerinde yapılan aşınma deneyleri sonucunda bulunmuştur (Schimazek ve Knatz, 1970).

Kayaçların çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden yararlanarak aşınma numuneleri St50 çeliğinden imal edilmiş, uçları konik, 90°, 0.3 mm'ye kadar köreltilmiş keskinle ve 45 N'luk baskı kuvvetiyle 16 m Archimed Spirali ile çizilir. Uçlarda meydana gelen ağırlık kaybı aşınma indeksinin fonksiyonu olarak kabul edilmektedir. Aşınma indeksi, numunelerin çekme dayanımı ve petrografik özelliklerinden elde edilir. Kayaçtaki kuvars ve diğer aşındırıcı minerallerin miktarı, bunların boyutları ve kayacın çekme dayanımı arttıkça aşınma da artacağına göre, aşınma indeksi bu parametrelerin çarpımıyla Eşitlik 1'den elde edilmektedir.

$$F = Q_{eqv} \cdot d_{ort} \cdot \sigma_t \quad (1)$$

Burada;

F = Schimazek aşınma indeksi, N/mm

$Q_{eqv}$  = Eşdeğer kuvars yüzdesi, %

$d_{ort}$  = Ortalama aşındırıcı mineral tane boyutu, mm

$\sigma_t$  = Dolaylı çekme dayanımı, MPa

Sert keskinle yapılan mekanize kazıda, Schimazek aşınma indeksi 0.5 N/mm'nin üzerinde olan kayalar çok aşındırıcı olduklarından kesilemezler. Ancak, arında çok çatlağın ve kırığın var olması durumunda, bu kazılabilirlik kriterinin 1 N/mm'ye kadar çıkması mümkündür. Ayrıca, disk tipi keskinle yapılan kazıda Schimazek aşınma indeksi değeri 2.7 N/mm'ye kadar olan kayaların kazısının yapılabileceği de saptanmıştır (Bilgin, 1989). Çizelge 3'de Schimazek aşındırıcılık sınıflaması verilmiştir.

Çizelge 3. Schimazek aşındırıcılık sınıflaması (Schimazek ve Knatz, 1970)

Schimazek aşınma indeksi (F), N/mm	Sınıfı
< 0.01	Hiç aşındırıcı değil
0.01 – 0.05	Çok az aşındırıcı
0.05 – 0.1	Hafif aşındırıcı
0.1 – 0.5	Orta aşındırıcı
0.5 – 1.0	Aşındırıcı
1.0 – 2.0	Çok aşındırıcı
2.0 – 4.0	Çok fazla aşındırıcı
> 4.0	Oldukça fazla aşındırıcı

Ewendt (1989), Almanya'da Saar Kömür Havzası'nda yaptığı aşınma deneyleri sonucunda F ile CAI arasında Eşitlik 2'deki gibi bir ilişki bulunmuştur (Tamrock'dan 1999).

$$CAI = 0.6 + 3.32 \cdot F \quad (2)$$

Yaralı ve Akçın (2005) Zonguldak kömür çevre kayaları üzerinde yaptığı aşınma deneyleri sonucunda Schimazek ve Cerchar aşınma indeksleri arasında Eşitlik 3'deki gibi doğrusal bir ilişki saptamıştır.

$$CAI = 0.8735 + 0.3958 \cdot F \quad R^2 = 0.865 \quad (3)$$

Burada;

CAI = Cerchar aşınma indeksi

F = Schimazek aşınma indeksi

Yaralı (2010), yaptığı çalışmada bu indeks deney yöntemi arasındaki ilişkileri 16 kayaç için araştırmış ve bu indeks deneyleri arasında doğrusal ilişkiler elde etmiştir

Majeed ve Ebu Bakar (2016), Pakistan bölgesine ait 46 adet sedimanter ve magmatik kayaç üzerinde yaptıkları aşındırıcılık deneylerinde CAI ile Schimazek aşınma indeksi (F) deney sonuçlarını karşılaştırmışlardır ve bu iki aşınma indeksi deney sonuçları arasında Eşitlik 4'de gösterildiği gibi üstel bir ilişki bulmuşlardır.

$$CAI = 2.77 \cdot (F)^{0.31} \quad R^2 = 0.73 \quad (4)$$

## 1.3 Norveç Aşınma İndeks Deneyi (AV)

Kayaçların delinebilirliğinin tahmini için kullanılan yöntem, 1960'ların başında Norveç Teknoloji Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Bölümünde geliştirilmiştir (Lien, 1961). Bu deney metodu kırılarak toz haline getirilmiş (<1 mm) kaya

örneklerinin zamana bağlı olarak tungsten karbid uç üzerindeki aşınmanın ölçüsüdür (Dah, 2003).

1980'lerin başından beri, Norveç Teknoloji Enstitüsü (NTNU) İnşaat ve Yapı Mühendisliği Bölümünün geliştirdiği metoda göre deney yöntemi genel olarak sert kayalarda TBM aşınma performansını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Dahl vd, 2012).

Dahl vd (2012), 60 farklı türdeki kayaç üzerinde hem CAI hem de Norveç aşınma indeks deneyleri yapmışlardır. AV değerlerinin 0.5 ile 72 arasında değişirken, CAI değerlerinin 2.3 ile 6.9 arasında değiştiklerini bulmuşlardır. Bu iki deney arasında da korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) 0.4641 olan doğrusal bir ilişki yakalamışlardır.

Bu deneyde, 1mm'den daha az boyuttaki parçalanmış taş tozu 10 kg ağırlıkla yüklenmiş tungsten karbid ucun altından geçer. Aşınma miktarı deri çelik disk tablanın 100 devirden sonra deney ucunun miligram cinsinden ağırlık kaybı olarak belirlenir. 100 devir 5 dakikalık deney süresi demektir. Bu deneyde kısaca, parçalanmış taş tozuna sürtünen tungsten karbid ucun zamana bağlı olarak aşınmasını ölçer. Norveç aşınma indeks deneyinin ana hatları Şekil 2'de, bu çalışmada kullanılan deney aleti ise Şekil 3'de gösterilmiştir (Dahl, 2003).

Norveç aşınma indeks deneyi (AV), çelik uçla Norveç aşınma deneyi (AVS), uç aşınma indeks (BWI) ve keski ömrü indeks (CLI) deneylerine ait sınıflama aralığı Çizelge 4'de verilmiştir.

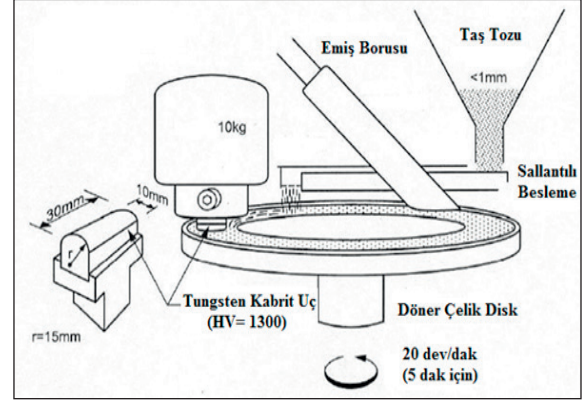
Çizelge 4. Aşınma indeks deneylerinin sınıflaması (Dahl, 2003)

Sınıf	AV	AVS	BWI	CLI
Oldukça düşük	<1	<1	≤10	<5
Çok düşük	2-3	2-3	11-20	5.0-5.9
Düşük	4-10	4-12	21-30	6.0-7.9
Orta	11-27	13-25	31-44	8.0-14.9
Yüksek	28-41	26-35	45-55	15.0-34
Çok yüksek	42-58	36-44	56-69	35-74
Oldukça yüksek	>58	>44	≥70	≥75

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında Zonguldak Bölgesi'nin farklı yerlerinden getirilen kayaç örnekleri Çizelge 5'de gösterilmiştir. Gerek örneklerin araziden alınmasında gerekse laboratuvarında deneylerin

yapılmasında Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) önerileri dikkat edilmiştir. Brazilian dolaylı çekme dayanımı ve Cerchar aşınma indeksi deneylerinde örnek çapı yaklaşık 54 mm olan karot örnekler kullanılmıştır.



Şekil 2. Norveç aşınma indeks deneyi ana hatları (Dahl, 2003)



Şekil 3. Norveç aşınma indeks deneyi düzeneği

Schimazek aşınma indeks deneyi Eşitlik 1'de yer alan büyüklükler, tek eksenli dolaylı çekme dayanım sonuçlarına ve petrografik analiz verilerine göre hesaplanarak bulunmuştur. Ayrıca, bu çalışmada Eşitlik 1'deki eşdeğer kuvars içerikleri ve aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyutları örnek verilerle nasıl bulunduğu gösterilmiştir.

Brazilian çekme dayanımı deneyi için disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yüklemeye altında çekme dayanımlarının dolaylı olarak tespiti için, ISRM (1978) tarafından önerilen bir dayanım deney yöntemidir. Yapılan deneylerde H/D oranı 0.5 olacak şekilde örnekler

hazırlanmış, örneklerin alt ve üst yüzeyleri kabaca düzeltilmiştir. Her bir kaya örneği için 10'ar adet deney yapılmıştır. Örneklerin yenilmesi 20-35 saniye arasında gerçekleşmiştir. Brazilian çekme dayanımı değeri Eşitlik 5'den hesaplanmıştır.

Çizelge 5. Kayaç örneklerinin alım yerleri

No	Örnek Adı	Alındığı Yer
1	Kireçtaşı	Zonguldak-Kdz. Ereğli 15. km
2	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 24. km
3	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	Zongulda-Kdz. Ereğli 25. km
4	Plaket kireçtaşı	Zonguldak-Kdz. Ereğli 47. km
5	Andezit (Bozuşmuş)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 33. km
6	Andezit (Koyu Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 34. km
7	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 35. km
8	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 42. km
9	Andezit (Açık Renk)	Zonguldak-Kdz. Ereğli 43. km

$$\sigma_t = 0.636 * \frac{F}{D * t} \quad (5)$$

Burada;

$\sigma_t$  = Brazilian çekme dayanımı, MPa

F = Yenilme yükü, N

t = Örnek kalınlığı, mm

Schormair vd (2006)'ya göre kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı Çizelge 6'da gösterilmiştir. Çizelge 6'daki katsayılar ile kayaçlara karşılık gelen aşındırıcı mineral oranları çarpılarak (içeriğinde herhangi bir mineral olmadığı durumlarda  $Q_{eqv}$  değeri sıfır (0) olarak alınmıştır.), kayaçların toplam eşdeğer kuvars içerikleri ( $Q_{eqv}$ ) saptanmıştır ve bu hesaplamanın bir örneği Çizelge 7'de gösterilmiştir. Kayaçlar içerisinde bulunan aşındırıcı minerallerin ortalama tane boyutları ( $d_{ort}$ ) da belirlenmiştir. Çizelge 8'de aşındırıcı mineral ortalama tane boyutunun örnek hesaplaması görülmektedir. Çizelge 9'da ise kayaçların petrografik analiz sonuçlarına göre bulunan petrografik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6. Kayaçların Rosival aşındırıcılık katsayısı değerleri (Schormair vd, 2006)

Mineral	Rosival aşındırıcılık katsayısı (%)
Feldspat	32
Piroksen	43
Kuvars	100
Pirit ve biotit	55
Kalsit/ kil	4
Mika	4
Plajiolklas	25
Potasyum feldspat	25

Çizelge 7. Eşdeğer kuvars içeriğinin örnek hesaplanması (Bulut, 2017)

5-Andezit (Bozuşmuş)			
Mineral Adı	Aşındırıcı Mineral Oranı (%)	Rosival Katsayısı	$Q_{eqv}$ (%)
Kuvars		100	0
Feldspat	50	33	16.5
Piroksen	20	43	8.6
Kalsit		4	0
Kil ve Opak	10	4	0.4
Mika	20	4	0.8
Pirit ve biotit		55	0
Plajiolklas		25	0
Potasyum feldspat		29	0
Toplam Eşdeğer Kuvars İçeriği			<b>26.30</b>

Cerchar aşınma indeks deneyinde, kayaçların aşındırıcılıkları belirlemek için West tam otomatik Cerchar aşınma indeks deney aleti kullanılmıştır (Şekil 4). Kayaç örnekleri üzerindeki çizme işlemi, her defasında yeni bir uçla ve ISRM (2015)'e göre yapılmıştır. Her bir kayaç örneği için üç farklı örnek üzerinde 5 kez çizme işlemi yapılmış ve ortalama sonuçlar kayacın aşındırıcılığı olarak değerlendirilmiştir. Deneylerde HRC55±1 sertliğindeki uçlar kullanılmıştır.

Çizelge 8. Aşındırıcı mineral ortalama tane boyutunun örnek hesaplanması (Bulut, 2017).

5-Andezit (Bozuşmuş)			
Mineral Adı	Mineralojik Bileşim (%)	Tane Boyutu (mm)	$d_{ort}$ (mm)
Kuars	-		0
Feldspat	50	0.7	0.35
Piroksen	20	0.4	0.08
Kalsit			0
Kil ve Opak	10	0.2	0.02
Mika	20	1	0.20
Toplam Aşındırıcı Mineral Tane Boyutu			<b>0.65</b>

Çizelge 9. İncelenen Kayaçların petrografik değerleri

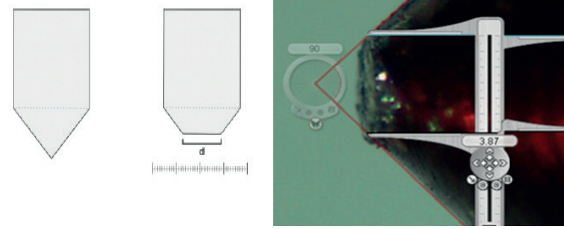
Kayaç No	$d_{ort}$ (mm)	$Q_{eqv}$ (%)
1	0.0178	5.92
2	0.0928	6.88
3	0.074	6.88
4	0.0928	7.84
5	0.65	26.30
6	1.43	23.85
7	0.79	26.75
8	0.92	29.65
9	1.215	29.65

$d_{ort}$  = Aşındırıcı mineral ortalama tane boyutu,  
 $Q_{eqv}$  = Eşdeğer kuvars içeriği,

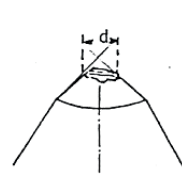


Şekil 4. West tam otomatik Cerchar aşınma indeks deney aleti

Aşınmış uçlar, BEÜ Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi Uygulama Laboratuvarı'nda bilgisayar destekli 35 büyütmeli bioküler mikroskop altında farklı konumlarda (yatay ve düşey) ölçülmüştür (Şekil 5).



a. Yatay konumdaki ucun görünümü.



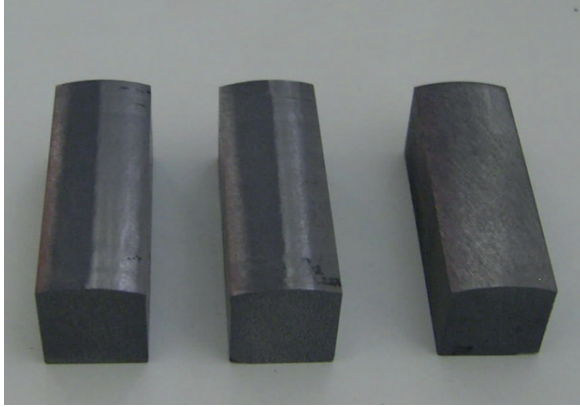
b. düşey konumdaki ucun görünümü.

Şekil 5. Cerchar aşınma indeks deneyinde aşınmış ucun mikroskop altında ölçümü

Ayrıca deneye başlamadan önce çelik uçlar yine bu mikroskopla bakılarak deney standardını (90° uç açısı durumu) sağlayıp sağlamadığı kontrol edilmiştir. Uygun olan uçlarla deney tekrarlanmıştır. 1/10 mm'lik aşınma yüzeyi bir birim Cerchar aşınma indeksi olarak kabul edilmiştir. Böylece, kayaçlara ait Cerchar aşınma indeks değeri 5 çizimin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur.

Norveç aşınma indeks deneyinin yapılmasında Dahl (2003) tarafından önerilen deney yöntemi izlenmiştir ve Şekil 3'de gösterilen deney aleti kullanılmıştır. Bu deney için boyut küçültme üç aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak karot örnekleri 10 mm açıklığa ayarlanmış çeneli kırıcıdan geçirilmiştir. Daha sonra malzeme, 3-4 mm aralığındaki konik kırıcıya beslenmiş ve elek altı 1 mm boyutlu elekte elle elenmiştir. < 1 mm olan malzeme bir tepsiye konularak bir tarafta bekletilmiştir. > 1 mm olan malzeme merdaneli kırıcıya beslenmiştir. Merdaneli kırıcıdan alınan malzeme yine 1 mm'lik elek aralığındaki elekte elenmiş elek üstü tekrar merdaneli kırıcıya beslenmiştir. Bu işlem beslenen malzemenin % 99'u – 1 mm'ye ininceye kadar tekrarlanmıştır.

Norveç aşınma deneyinde her kayaç örneği için deney en az iki kez tekrar edilmiştir. Her deneyde yeni uç kullanılmıştır. Şekil 6'da aşınmış ve kullanılmamış uçların resimleri gösterilmektedir.



Şekil 6. Norveç aşınma indeks deneyinde kullanılan aşınmış ve kullanılmamış uçlar

### 3. BULGULAR

9 farklı kayaç türü üzerinde yapılan üç farklı aşınma deney yönteminden elde edilen sonuçlar ile aşındırıcılık sınıflamaları Çizelge 10'da verilmiştir. Şekil 7'de üç farklı deney yöntemine göre kayaçların aşındırıcılıkların sütunsal olarak dağılımı gösterilmiştir.

Cerchar aşınma indeks deney sonuçlarının 0.96 ile 3.19, Schimazek aşınma indeks deney sonuçlarının 0.010 ile 2.954 arasında, Norveç aşınma indeks deney sonuçlarının ise 0.70 ile 6.80 arasında değiştiği belirlenmişlerdir.

Özellikle Norveç aşınma indeks deney yönteminde kullanılan uçtaki kütle kaybına göre kayaçların aşındırıcılıkları bulunduğu için, aşınma değerleri sayısal olarak diğer deney yöntemlerine göre daha büyük görülmektedir.

Schimazek aşınma indeksi ile hem Cerchar aşınma indeksi hem de Norveç aşınma indeks deney sonuçları arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Şekil 8, 9 ve 10). Bu üç aşınma deney yönteminin birbirleriyle karşılaştırıldığında doğrusal ilişkiler bulunmuştur. Eşitlik 6'da Schimazek aşınma indeksi ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki, Eşitlik 7'de Schimazek aşınma indeksi ile Norveç aşınma indeksi arasındaki, Eşitlik 8'de ise Norveç aşınma indeksi ile Cerchar aşınma indeksi arasındaki ilişkiler verilmiştir.

$$CAI = 0.5029 * F + 1.3342 \quad (6)$$

$$AV = 1.8089 * F + 0.8667 \quad (7)$$

$$CAI = 0.2803 * AV + 1.0858 \quad (8)$$

Literatüre bakıldığında bu üç indeks deneyi ile yapılmış araştırma sayısı oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Majeed ve Ebu Bakar (2016) çalışmalarında, Cerchar aşınma indeksi ile Schimazek aşınma indeksi ile arasında üstel ilişki bulmuş olmalarına rağmen, bu çalışma sonucunda üç aşınma indeksi arasında bulunan doğrusal ilişkiler literatürde daha önce yapılmış benzer çalışmalarla (Ewendt, 1989; Yaralı, 2005; Yaralı, 2010; Dahl vd, 2012) paralellik göstermektedir.

Deneylerden elde edilen sonuçlarıyla yapılan regresyon çözümlenmesi sonuçlarına göre seçilen bütün modellerde t ve f testleri %95 güvenlilikte istatistiksel olarak anlamlı sonuçlar bulunmuştur. Seçilen doğrusal modeller için yapılan hata analizi model hatalarının %95 güven aralığı dahilinde rastsal hatalar olduğunu göstermiş olup, veri sayısının da azlığı dikkate alındığında seçilen doğrusal modelin istatistiksel olarak kullanılabileceğini saptanmıştır.

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

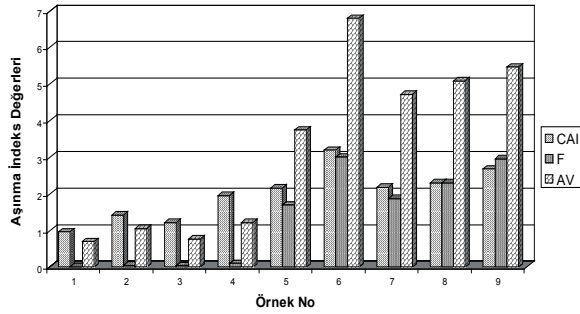
Bu üç deney yöntemine göre kayaçların aşındırıcılık değerleri bulunmuş ve aşındırıcılık sınıflaması yapılmıştır. Deney yöntemlerinin farklı olmasına rağmen sınıflama aralıkları aynı düzeyde oldukları görülmektedir. Bu durum, üç aşınma deney yönteminin birbirleriyle karşılaştırıldığında aralarında doğrusal ilişkiler göstererek kendini göstermiştir.

Her deney yönteminin tercih edildiği uygulama alanı mevcuttur. Örneğin sert kayaç için tünel açma makinalarının (hard rock TBM) performans tahmininde Norveç aşınma indeks deneyi tercih edilirken, Almanya'daki kolları galeri açma makinalarının performans değerlendirilmesinde Schimazek aşınma indeksi tercih edilmektedir.

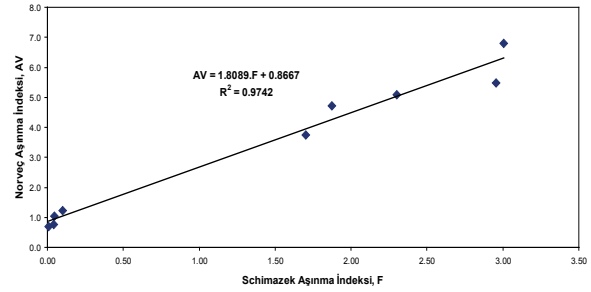
Bu çalışma sonucunda incelenen kayaçlar açısından bakıldığında, her üç yöntemde performans değerlendirilmesinde kullanılabileceği yönünde bir sonuç elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu üç yöntemden hangisini seçeceği projedeki tasarımcının kullanılacak mekanize kazı makinasına göre tercihine bağlı olmaktadır.

Çizelge 10. İncelenen kayaların üç farklı aşınma indeks deney sonuçları ile aşındırıcılık sınıflaması

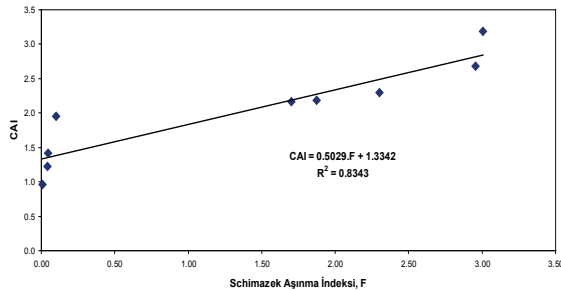
No	Örnek	Cerchar, CAI	Sınıfı	Schimazek, F	Sınıfı	Norveç, AV	Sınıfı
1	Kireçtaşı	0.96	Düşük	0.010	Çok az aşındırıcı	0.70	Oldukça düşük
2	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	1.42	Düşük	0.047	Çok az aşındırıcı	1.05	Oldukça düşük
3	Kireçtaşı (Kırmızı renk)	1.22	Düşük	0.043	Çok az aşındırıcı	0.77	Oldukça düşük
4	Plaket kireçtaşı	1.95	Orta aşındırıcı	0.099	Hafif aşındırıcı	1.22	Düşük
5	Andezit (Bozuşmuş)	2.16	Orta aşındırıcı	1.703	Çok aşındırıcı	3.75	Çok düşük
6	Andezit (Koyu Renk)	3.19	Yüksek	3.005	Çok fazla aşındırıcı	6.80	Çok düşük
7	Andezit (Açık Renk)	2.18	Orta aşındırıcı	1.874	Çok aşındırıcı	4.72	Düşük
8	Andezit (Açık Renk)	2.30	Orta aşındırıcı	2.300	Çok fazla aşındırıcı	5.09	Düşük
9	Andezit (Açık Renk)	2.68	Orta aşındırıcı	2.954	Çok fazla aşındırıcı	5.47	Düşük



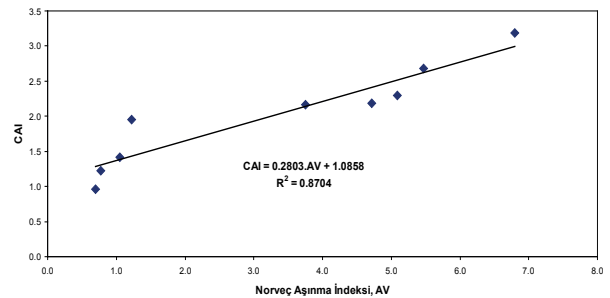
Şekil 7. Üç farklı aşınma indeks deney sonuçlarının dağılımı (F: Schimazek, CAI: Cerchar, AV: Norveç aşınma indeksleri)



Şekil 9. Schimazek aşınma indeksi (F) ile Norveç aşınma indeksi (AV) arasındaki ilişki



Şekil 8. Schimazek aşınma indeksi (F) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişki



Şekil 10. Norveç aşınma indeksi (AV) ile Cerchar aşınma indeksi (CAI) arasındaki ilişki

Sonuç olarak, Zonguldak Bölgesi'ne ait 9 farklı kayaç üzerinde yapılan üç farklı aşınma deney yöntemine göre kireçtaşlarının aşındırıcılıklarının andezit örneklerine göre daha az olduğu saptanmıştır. Ancak, kireçtaşı gibi kayaçların içerisinde çok az miktarda aşındırıcı mineral olmamasına rağmen termal aşındırıcılık özelliklerinden dolayı keski sarfiyatının fazla olacağı beklenmektedir. Andezit kayaçları içinde yapılacak delme ve mekanize kazı çalışmalarında ise keski tüketiminin daha fazla olması beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

Akün, M.E., Karpuz, C., 2005. Drillability Studies of Surface Set Diamond Drilling in Zonguldak Region Sandstones from Turkey. Technical Note, International Journal of Rock Mechanics Mining Science, 42, 473-479.

Alvarez, J.T., Alvarez, M.M., Diez, R.R., 2003. Experimental Results a Low-Power Roadheader Driving a Gallery with Different Types of Rock at The Face. Tunneling and Underground Space Technology, 18, 395-404.

Ateş, U., Bilgin, U., Çopur, H., 2014. Estimating Torque, Thrust ve Other Design Parameters of Different Type Tbm's with Some Criticism to TBMS Used İn Turkish Tunneling Projects. Tunneling and Underground Space Technology, 40,46-63.

Balci, C., Bilgin, N., Çopur, H., Tumaç, D., Akgül, M., 2007. Tünel Açma Makinelerinin Tam Boyutlu Kesme Deneyi ile Performans Tahmini., 1. Maden Makinaları Sempozyumu, TMMOB, Maden Mühendisleri Odası Yayını, Kütahya,61-70.

Balci, C., 2004. Mekanize Kazı Makinalarının Seçiminde Küçük Boyutlu Kazı İle Tam Boyutlu Kazı Deneylerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Yayınlanmamış.

Bilgin, N., 1989. İnşaat ve Maden Mühendisleri İçin Uygulamalı Kazı Mekaniği. Birsen Yayınevi, İstanbul,s.92.

Bilgin, N., Balci, C., Çopur, H., 2005. Tünel Açma Makinelerinin Seçim ve Tasarım İlkeleri Ve Performans Tahmin Yöntemleri. 2. İş Makineleri Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 29-30 Eylül-1 Ekim, İstanbul, 227-240.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2012. Effect of Replacing Disc Cutters With Chisel Tools on Performance of a

TBM in Difficult Ground Conditions. Tunneling and Underground Space Technology, 27,41-51.

Bulut, S., 2017. Kayaçların Aşındırıcılıklarının Farklı Deney Yöntemleriyle Belirlenmesi. Diploma Çalışması, BEÜ Maden Müh. Bölümü, Zonguldak, Yayınlanmamış.

Büchi, E., Mathier, J.F., Wyss, Ch., 1995. Gesteinsabrasivität – ein Bedeutender Kostenfaktor Beim Mechanischen Abbau von Fest- und Lockergesteinen. Tunnel, 5, 38-43.

Çapik, M., Yılmaz A.O., Kolaylı H., 2013. A Comparative Study on the Energy Demand of Turkey: Coal or Natural Gas. Energy Exoloration & Exploitation, 31,119-138.

Çopur, H., Rostami, J., Özdemir, L., Bilgin, N., 1997. Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunneling Projects. Fourth International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Volume 1, Brisbane, Queensland, 1- 7.

Çopur, H., Balci, C., Tumaç, D., Bilgin, N., 2011. Field and Laboratory Studies on Natural Stones Leading to Empirical Performance Prediction of Chain Saw Machines. International Journal of Rock Mechanic & Minining Science, 48(2),269-282.

Çopur, H., Aydın, H., Bilgin, N., Balci, C., Tumaç, D., Dayan, C., 2014. Predicting performance of EPB TBMs by using a Stochastic Model Implemented into a Deterministic Model. Tunneling and Underground Space Technology, 42,1-14.

Dahl, F., 2003. DRI Standards". NTNU, Angleggsdrift, Trondheim. s.21.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grøvn, E., 2012. Classifications of Properties Influencing The Drillability of Rocks, Based on the NTNU/SINTEF Test Method. Tunneling and Underground Space Technology,28 ,150-158.

Ersoy, C., Balci, C., 2013. Kollu Galeri Açma Makinelerinin Seçim Kriterleri ve Amasra Havzasına Uygulanması. 4. Maden Makinaları Sempozyumu, 23-24 Mayıs 2013, İzmir, Türkiye, 11-20.

Farmer, I.W.,Garrity, P., 1987. Prediction of Roadheader Cutting Performance from Fracture Toughness Considerations. In: Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics, Montreal, Canada, 1, 621-624.

Fowell, R.J., Johnson, S.T., 1982. Rock Classification and Assessment for Rapid Excavation.. Proc. of the Symp. on Strata Mech., Newcastle Upon Tyne, 241-244.

- ISRM, 1978. Suggested Method for Determining Tensile Strength of Rock Materials. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science. & Geomech. Abstr.*, 15, 99-103.
- ISRM, 2015. Suggested Method for Determining the Abrasivity of Rock by The Cerchar Abrasivity Test, The ISRM Suggested Method for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014, In: R. Ulusay (Eds), Springer, DOI:10.1007-978-3-319-07713-0 101-106.
- Kahraman, S., Ipek, M., Guleryuz, U., Gunaydin, O., 2006. Pozantı-Ankara Otoyol Tüneli'nde Bir Jumbo Matkap Performansının Tahmini. *ITA-AITES World Tunnel Congress & 32nd ITA General Assembly*, 22-27 April, Seoul, Korea, 132-141.
- Kahraman, S., Kahraman, E., 2013. Kollu Galeri Açma Makinelerinin Dolaylı Testler Kullanılarak Performans Tahmini. 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Sempozyumu, Editörler: Bilgin, N., Çopur, H., Balcı, C., İstanbul, 65-73.
- Kasling, H., Thuro, K., 2010. Determining Rock Abrasivity in the Laboratory. In: Z. Labiouse and D. Mathier (Eds) *Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering -Proc EUROCK 2010* Taylor & Francis, London, 425-429.
- Lien, R., 1961. An Indirect Test Method for Estimating the Drillability of Rocks. *Dotorate Dissertation*, NTH Department of Geology, Norway (in Norway).
- Majeed Y., Abu Bakar M. Z., 2016. Statistical Evaluation of CERCHAR Abrasivity Index (CAI) Measurement Methods and Dependence on Petrographic and Mechanical Properties of Selected Rocks of Pakistan. *Bull Eng Geol Environ*, 75, 1341-1360.
- Ökten, G., Çınar, M., Çopur, H., Bilgin, N., 2014. İstanbul-Selimpaşa Atıksu Tüneli'nin Kazısı Sırasında EPB TBM'in Kazı Odasında Meydana Gelen Grizu Patlamasının Nedenleri, Sonuçları ve Alınan Önlemler. *Tünel*, Sayı: 2 (Ocak-Şubat), 14-19.
- Özaydın, Y.T., Avunduk, E., Çopur, H., 2013. Büyükçekmece Atıksu Tüneli Kazılarında EPB TBM Performansı. 3. Uluslararası Ulaşımında Yeraltı Sempozyumu, N. Bilgin, H. Çopur, C. Balcı (Eds), İstanbul, 151-157.
- Özdemir, L., Gertsch, L., Neil, D., Fiant, J., 1991. Performance Predictions for Mechanical Excavation in Yucca Mountain Tuffs. *EMI-Report. SAND 91-1035*, s.18.
- Özdemir, L., Nilsen, B., 1999. "Recommended Laboratory Rock Testing for TBM Projects. *AUA News*, 14(2), 21-14.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G., 2003. Testing Conditions and Geomechanical Properties Influencing The Cerchar Abrasiveness Index (CAI) Value. *Technical Note, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 40, 259-263.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., 2004. Wear Prediction in Hardrock Excavation Using The Cerchar Abrasiveness Index (CAI) Value. *Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquy*, Essen, 599-564.
- Rostami, J., Özdemir, L., 1994. Roadheader Performance Optimization for Mining and Civil Construction. *13th Annual Technical Conference, Institute of Shaft Drilling Technology, Las Vegas, USA*, 1-17.
- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, M.D., 1994. Performance Prediction, a Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining. *Mining Engineer*, 11, 1263-1267.
- Rostami, J., Özdemir, L., Nilsen, B., 1996. Comparison Between CSM and NTH Hard Rock TBM Performance Prediction Models. In *Proc. 16th Int. ISDT Symposium*, Las Vegas, USA, 1-11.
- Rostami, J., Özdemir L., Bruland, A., Dahl, F., 2005. Review of Issues Related to Cerchar Abrasivity Testing and Their Implications on Geotechnical Investigations and Cutter Cost Estimates. *Rapid Excavation and Tunnelling Conference.*, Seattle, WA, USA, 15-14.
- Schimazek, J., Knatz, H., 1970. Der Einfluss des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisseverschleis von strecken vortriebsmaschinen. *Glückauf*, 106, 274 - 278.
- Schormair, N., Thuro, K., Plinninger, R., 2006. The Influence of Anisotropy on Hard Rock Drilling and Cutting. *The Geological Society, IAEG-491*, 1-11.
- Su, O., Yaralı, O., Akçin, N.A., 2013. Comparison of Drilling Performance of Chisel and Button Bits on the Electro Hydraulic Driller. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/S00603-012-0358-3; 46(3), 1577-1586.
- Tamrock, 1999. *Rock Excavation Handbook*. M. Heiniö (Ed.), Sandvik Tamrock Corporation, s. 305.
- Thuro, K., Plinninger, R. J., 1999. Roadheader Excavation Performance, Geological and Geotechnical Influences. *9th ISRM Congress*, 25-28 August, Paris, 1241-1244.
- Wijk, G., 1992. A Model of Tunnel Boring Machine Performance. *Geotechnical and Geological Engineering*, Chapman & Hall, 10, 19-21.



Valantin, A., 1973. Examen des Differens Procedes Classiques de Determination de la nocivite des Roches. vis-à-vis de l'attaque Mecanique, 133–140.

Yaralı, O., Akçın, N.A., 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı. 9-12 Haziran, İzmir, 243-253.

Yaralı, O., 2005. Zonguldak Taşkömür Havzası Kömür Çevre Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi Bildiriler Kitabı, 9-12 Haziran, İzmir, s.243-251.

Yaralı, O., 2010. Zonguldak Bölgesi Kayaçlarının Aşındırıcılık Özelliklerinin Belirlenmesi. Türkiye 17. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, s. 203-215.

Yaralı, O., Soyer, E., 2013. Assessment of Relationships Between Drilling Rate Index and Mechanical Properties of Rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33, 46-53.

Yaralı, O., Duru, H., 2016. Investigation into Effect of Scratch Length and Surface Condition on Cerchar Abrasivity Index. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 111-120.



Derleme / Review

## CEVHER HAZIRLAMADA MEKANİK AKTİVASYON UYGULAMALARI

### MECHANICAL ACTIVATION APPLICATIONS IN MINERAL PROCESSING

Meryem Göktaş<sup>a,\*</sup>,<sup>a</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, M.Y.O., Makine ve Metal Teknolojileri, Metalurji Programı, BİLECİK

**Geliş Tarihi / Received** : 8 Ağustos / August 2017  
**Kabul Tarihi / Accepted** : 15 Aralık / December 2017

**Anahtar Sözcükler:**

Cevher hazırlama,  
 Mekanokimya,  
 Mekanik aktivasyon,  
 Öğütme,  
 Değirmenler.

**Keywords:**

Mineral processing,  
 Mechanochemistry,  
 Mechanical activation,  
 Grinding,  
 Mills.

**ÖZ**

Mekanik aktivasyon, temel bir metalurjik süreç öncesinde mineralin bu süreçlerdeki durum değişimleri sırasındaki reaktifliğini artırmak üzere uygulanan bir ön-işlemdir. Cevher hazırlama proseslerinde mekanik aktivasyon işlemleri öğütme değirmenlerinde gerçekleştirilir. Çünkü cevher hazırlama proseslerinde mekanik aktivasyonun en önemli etkisi, fizikokimyasal özelliklerinde değişikliğe yol açacak şekilde mineral tanelerinin ufalanmasıdır. Mekanik aktivasyon sırasında mineralin kristal yapısı bozulur ve daha reaktif türler oluşur. Böylece, aşırı şartlar altında öğütülmüş mineral, elden geçirileceği metalurjik süreç sırasında artık daha aktif olarak davranacak ve bu durum, sürecin hızını artıracaktır. Tepkime sıcaklığını düşürmek, çözünürlük miktarı ve hızında artış sağlamak, suda çözünür bileşiklerin hazırlanması, basit ve daha ucuz reaktör üretimi ve daha kısa tepkime süresi gereksinimi mekanik aktivasyonun bazı üstünlüklerindedir. Bu nedenlerle, mekanik aktivasyon metalurjik süreçlerde çekici bir konu olmaktadır. Bu çalışmada ise, çeşitli cevher hazırlama tesislerinde, hidrometalurjik elden geçirim süreçlerinde mekanik aktivasyonun uygulamalarını inceleyen birçok çalışma ele alınarak incelenmiştir.

**ABSTRACT**

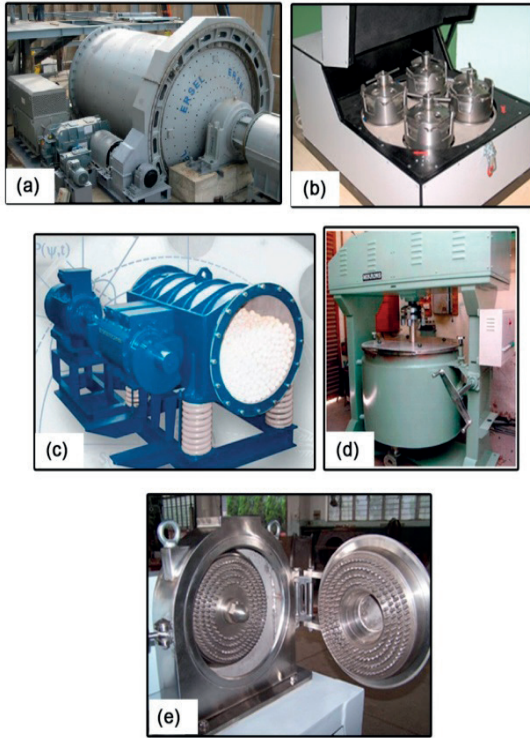
Mechanical activation is a pre-process applied to increase the reactivity of the mineral in the course of state changes in these processes prior to a basic metallurgical process. In the mineral preparation processes, the mechanical activation processes are carried out in the grinding mills. Because the most important effect of mechanical activation in mineral preparation processes is the milling of mineral particles, which leads to a change in their physicochemical properties. During mechanical activation, the crystal structure of the mineral deteriorates and more reactive species form. Thus, under extreme conditions, the milled mineral will now be more active during the metallurgical process to be carried out, and this will increase the process speed. Reducing the reaction temperature, increasing the amount of solubility and speed, preparation of water-soluble compounds, simple and cheaper reactor production and shorter reaction time requirements are some of the advantages of mechanical activation. For these reasons, mechanical activation is an attractive topic in metallurgical processes. In this study, several studies investigating the application of mechanical activation in hydrometallurgical leaching processes in various mineral processing plants have been examined.

\* Sorumlu yazar: [merem.goktas@bilecik.edu.tr](mailto:merem.goktas@bilecik.edu.tr) \* <https://orcid.org/0000-0003-1583-8300>

## GİRİŞ

Aşırı ince öğütmenin, cevherler üzerine uygulandığında üç farklı mekanizmasından bahsetmek mümkün olup bunlar; (1) Serbestleşme etkisi (2) Taneler üzerinde oluşacak olan pasifleştirici film tabakasının uzaklaştırılması ve (3) Mekanik aktivasyon (Celep ve Alp, 2008) olarak sıralanabilir.

Aşırı öğütmeyle, ince tane sayısı artmakta, böylece daha önce ortaya çıkmamış taze yüzeyler oluşmaktadır (Baldyrev, 2004). Mekanik aktivasyonun başlıca etkisi, fizikokimyasal özelliklerinde değişikliğe yol açacak şekilde mineral tanelerinin ufalanmasıdır. Mekanik aktivasyon sırasında mineralin kristal yapısı bozulur ve daha reaktif türler oluşur. Böylece, aşırı şartlar altında öğütülmüş mineral, elden geçirileceği metalurjik süreç sırasında artık daha aktif olarak davranacak ve bu durum, sürecin hızını artıracaktır (Baláz ve Achimovičová, 2006).



Şekil 1. Endüstriyel amaçla kullanılan değirmenler (a) Döner tamburlu değirmen, (b) Gezegenel değirmen, (c) Titreşimli değirmen, (d) Karıştırmalı değirmen, (e) Milli değirmen (Göktaş, 2013)

Tane boyutunun küçültülmesi için belirli bir dış kuvvetin yeterli bir süre ve hızla taneye uygulanması gerekir. Aksi takdirde kuvvetin etkisi

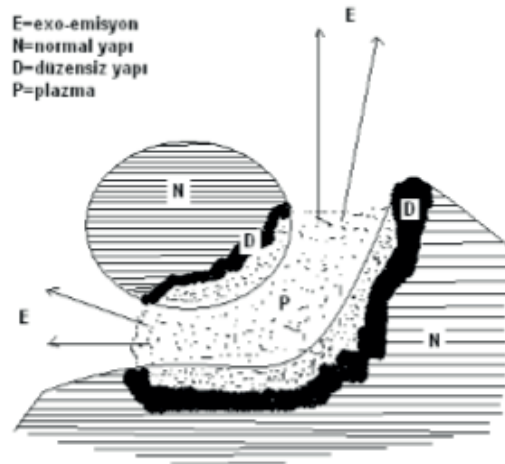
kalktığında, tane ilk şeklini tekrar alacak, yani malzemenin iç kuvvetleri yenilemeyecek ve tane boyutu küçülmeyecektir (Yıldız, 1999).

Mekanokimya, kimyasal, fiziksel ya da fizikokimyasal durum değişikliklerinin mekanik enerji aktarımının yoğun olduğu bir sistemde gerçekleşmesidir (Baláz, 2000). Mekanokimyasal bir ön işlem olan mekanik aktivasyon ise, kavurma ya da liç gibi temel bir metalurjik süreç öncesinde mineralin bu süreçlerdeki reaktifliğini artırmak üzere uygulanır ve mekanik enerjinin yoğun biçimde aktarılabildiği öğütme değirmenlerinde gerçekleştirilir (Baláz, 2000; Wang ve Forsberg, 2007).

Mekanik aktivasyon için kullanılan değirmenler Vibrokinetik enerji değirmeni, planeteri (gezegenel hareketli) değirmenler, santrifüj değirmenler, eksantrik titreşimli değirmenler, karıştırmalı bilyalı değirmenler ve jet değirmenlerdir. Bu değirmenlerden endüstriyel olarak kullanılanları Şekil 1’de yer almaktadır (Göktaş, 2013).

## 1. MEKANİK AKTİVASYON TEORİSİ

Mekanokimyada ilk model Thiessen isimli bir araştırmacı tarafından 60’lı yıllarda “Magma-Plazma Modeli” olarak ortaya konmuştur. Bu modele göre, birbirleriyle çarpışan partiküllerin temas noktalarında büyük miktarda enerji açığa çıkmaktadır. Bu enerji, katı maddenin bir üst enerji seviyesine çıkmış kısımlarının, elektron ve fotonların emisyonuyla (yayılmalarıyla) karakterize edilen özel bir plazmatik hal oluşumu için yeterli olmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Çarpışan taneler için Magma-plazma modeli (Thiessen vd., 1967)

Temas halindeki partiküllerin yüzeyi oldukça düzensiz yapıda olup bölgesel sıcaklıklar 10000°K'nin üzerine çıkabilmektedir. Thiessen, enerji seviyesinin arttığı hal esnasında veya işlem tamamlanır tamamlanmaz partiküllerin yüzeyinde meydana gelen reaksiyonların sonucu olarak ortaya çıkan plazma reaksiyonlarını fark etmiştir. Bu gözlemler tek bir mekanizmaya uymayan mekanik aktive edilmiş reaksiyonlar için önemli sonuçlar ortaya koymuştur (Baláz, 2000).

Smekal (1952), mekanik aktivasyon terimini "katının reaksiyona girme yeteneğinde artış sağlayan bir proses" olarak ifade etmektedir. Yapıda ya da kompozisyonda bir değişim mevcutsa bu mekanokimyasal bir prosestir. Butjagin adlı bilim adamı mekanik aktivasyonu katı yapısında stabil değişimler nedeniyle reaksiyon kabiliyetinde bir artış olarak tarif etmiştir (Baláz, 2000; Celep ve Alp, 2008).

## 2. MEKANİK AKTİVASYONUN ENDÜSTRİYEL UYGULAMALARI

Birçok avantajı olan mekanik aktivasyonun endüstriyel bazdaki uygulamalarının bazıları aşağıda kısaca anlatılmaktadır.

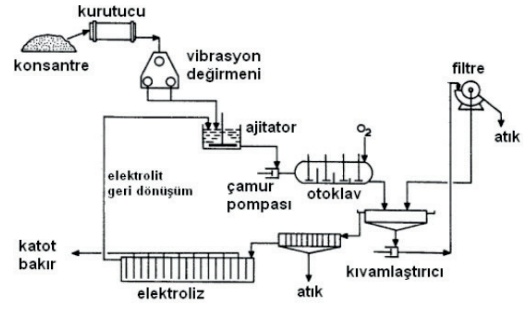
### 2.1.Lurgi-Mitterberg Prosesi

Şekil 3'de akım şeması verilen Lurgi-Mitterberg prosesi ile bakır eldesinde, kalkopiritin ( $CuFeS_2$ ) liç edilebilirliği, titreşimli bir değirmen vasıtasıyla mekanik aktive edilerek artırılmıştır. Kalkopirit konsantresinin liç işlemi endüstriyel skalada Lurgi-Mitterberg prosesinde test edilmiştir. Kalkopirit, liç edici maddelere karşı oldukça refrakterik özelliğe sahiptir. Yüksek basınç ve sıcaklıklar altında bile bakır kazanımı yaklaşık % 20'ler seviyesindedir (Habashi, 1978). Böylelikle kalkopirit konsantresinden yaklaşık %96 verimle bakır kazanımı sağlanmıştır. Yetmişli yıllarda kullanımda olan bu prosesten yüksek operasyon maliyetleri ve yüksek enerji tüketimi nedeniyle vazgeçilmiştir (Baláz, 2000).

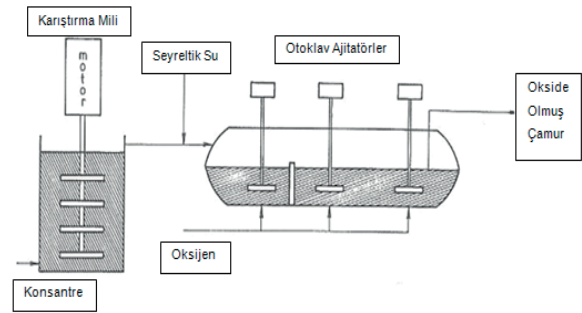
### 2.2. Activox Prosesi

Son yıllarda Avustralya'da sülfürlü cevher konsantrelerinin kavrulması ön işlemine alternatif olarak geliştirilmiş olan Activox prosesinin şematik görünümü Şekil 4'de verilmiştir. Bu proses, ultra-ince öğütme ve öğütme altında basınçlı

oksidasyon olmak üzere iki operasyon ünitesi içermektedir. Mekanik aktivasyon genelde ilk kademedeki gerçekleşir. İlk kademedeki gelen seyreltilmiş çamur, basınçlı oksidasyon işleminin gerçekleştiği otoklav kademesine geçer (Corrans vd., 1995).



Şekil 3. Lurgi-Mitterberg prosesinin akım şeması (Bianardi ve Pietsch, 1976).



Şekil 4. Activox prosesinin şematik görünümü (Corrans vd., 1995).

### 2.3. Irigetment Prosesi

Eski Sovyetler Birliği'nde altın içeren bazı sülfürlü minerallerin siyanürleştirme liçi üzerine mekanik aktivasyonun etkisi olduğunun belirlenmesiyle geliştirilen yoğun çalışmalar, IRIGETMET prosesinde denenmiştir. Mekanik aktivasyon sonrasında siyanürleştirme süresi kısalmıştır. Mekanik aktivasyon işlemi ile altın kazanımı %11 civarında artmış, siyanürleştirme süreci kısalmıştır. Mekanik aktivasyon işlemi ile altın kazanımında artış olmasına rağmen NaCN tüketiminde artış olmamaktadır (Baláz, 2000).

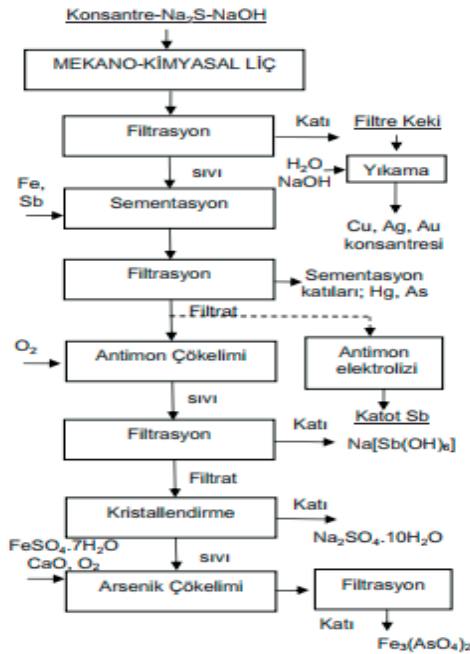
### 2.4. Sunshine Prosesi

Sunshine Mining & Refining Company isimli şirket 1984 yılında antıman, bakır ve gümüş içeren sülfürlü kompleks cevherlerin hidrometalurjik

işlemine yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Bu çalışma, nitrik asit uygulamalı sülfürik asit oksijen basınç liçine dayanmaktadır. Bu işlem, tetrahedritin alkali liçinden sonra oluşan katı atıktan gümüş ve bakır kazanımına izin vermektedir. Çok sayıdaki altın yataklarından elde edilen cevherler, çok ince öğütme işlemine karşı dirençlidir. Metprotech prosesi'nde ise öğütme işlemi yapılacak besleme çamuruna siyanür ilavesi yapılmakta ve altının siyanürleştirilmesi değirmen içinde gerçekleştirilmektedir. Bu mekanokimyasal liç işlemi, altının bir kısmının doğrudan değirmende kazanılmasını sağlamaktadır. Bu faktör de siyanürle yapılan kimyasal liç işlemiyle altın kazanımı maliyetinde önemli avantaj sağlamaktadır. Bu prosesin ilk endüstriyel uygulaması 1988 yılında yapılmış, 1988-1998 yılları arasında Güney Afrika, Avustralya ve Yeni Zelanda'da da hizmete girmiştir (Baláz, 2000).

## 2.5. Melt Prosesi

1992 yılında Berlin Teknik Üniversitesi ile Slovakya Bilimler Akademisi ortaklaşa olarak yeni bir metodu test etmişlerdir. Bu yeni proses (MELT-Mechanochemical Leaching of Tetrahedrite) Slovakya'da yarı endüstriyel skaladaki atritörlerde denenmiştir (Baláz, 2000; Erkuş, 2006). Şekil 5'de bu proses için örnek bir akım şeması verilmiştir (Sekula vd., 1998; Baláz and Achimovicová, 2006).



Şekil 5. Melt Prosesi Akım Şeması (Sekula vd., 1998; Baláz and Achimovicová, 2006).

## 2.6. Metprotech Prosesi

Yoğun bir laboratuvar ve pilot çalışmaları sonrasında madencilik ve metalurjik uygulamalar için uygun bir öğütme işlemi METPROTECH tarafından geliştirilmiştir. Çok sayıdaki altın yatağı, çok ince öğütme işlemine karşı dirençlidir. Bu proseste ise öğütme işlemi yapılacak besleme çamuruna siyanür ilavesi yapılmakta ve altının siyanürleştirilmesi değirmen içinde gerçekleştirilmektedir. Bu mekanokimyasal liç işlemi, altının bir kısmının doğrudan değirmende kazanılmasını sağlamaktadır. Bu faktör de siyanürle yapılan kimyasal liç işlemiyle altın kazanımı maliyetinde önemli avantaj sağlamaktadır. METPROTECH prosesinin ilk endüstriyel uygulaması 1988 yılında yapılmış, 1988-1998 yılları arasında Güney Afrika, Avustralya ve Yeni Zelanda da hizmete girmiştir (Baláz, 2000; Küçük, 2006; Erkuş, 2006).

## 3. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Tepkime sıcaklığını düşürmek, çözünürlük miktarı ve hızında artış sağlamak, suda çözünür bileşiklerin hazırlanması, basit ve daha ucuz reaktör üretimi ve daha kısa tepkime süresi gereksinimi mekanik aktivasyonun bazı üstünlüklerindedir. Bu nedenlerle, mekanik aktivasyon metalurjik süreçlerde çekici bir konu olmaktadır. Çeşitli önemli endüstriyel minerallerin hidrometalurjik elden geçirim süreçlerinde mekanik aktivasyonun etkisini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Baláz, 2003; Welham, 2000; Welham, 2002; Pourghahramani ve Forssberg, 2007; Erdemoğlu, 2009; Erdemoğlu, vd., 2010, Taşkın vd., 2005a; Taşkın vd., 2005b, Taşkın, 2005).

Bu nedenlerle mekanik aktivasyon, metalurjik süreçlerde çekici bir konu olmaktadır. Dolayısıyla önemli endüstriyel minerallerin hidrometalurjik veya pirometalurjik elden geçirim süreçlerinde mekanik aktivasyonun etkisini inceleyen çalışmalara yer verilmiştir. Mekanik aktivasyon işlemi ile tungsten karbür üretmek için  $\text{CaWO}_4$  ve kokun karbotermik kavurma işlemi öncesinde birlikte öğütülmesinin karbotermik tepkime hızında belirgin artışlara yol açtığı bildirilmektedir (Welham, 2000; Welham, 2002). Bir diğer çalışmada ise mekanik aktivasyon işlemi sülfürlü minerallerin termal süreçlerinde, oksidasyon, bozulma ve süblimleşme sıcaklıklarını düşürdüğü görülmüştür (Baláz ve Ebert, 1991).

Planeteri bilyalı değirmende gerçekleştirilen mekanik aktivasyonun hematitin hidrojen gazıyla indirgenme davranışını değiştirdiğini; indirgenme sıcaklığının düşük sıcaklık zonunda gerçekleştiğini bildirmişlerdir (Pourghahramani ve Forssberg, 2007). Benzer şekilde, stronsiyum karbonat üretiminde kullanılan SrS üretmek amacıyla selestitin ( $SrSO_4$ ) kokla birlikte öğütülerek mekanik olarak aktifleştirilmesi, SrS'ün 1100 °C'den daha düşük sıcaklıklarda oluşmasını sağladığı açıklanmaktadır (Erdemoğlu ve Gock, 2009; Erdemoğlu, 2009).

Küçük (2006) tarafından yapılan bir başka çalışmada, orijinal ve 15 dakika mekanik aktive edilmiş alunitin farklı ısıtma hızlarında alınan TG analizinden kinetik incelemesi yapılmıştır. Ozawa yöntemine göre yapılan kinetik incelemede mekanik aktivasyon işleminin, alunitin dehidratasyon ve desülfatasyon reaksiyonunun aktivasyon enerjilerine etkileri incelenmiştir. Şekilden görülmektedir ki mekanik aktivasyon işlemi aktivasyon enerjisindeki değerler de oldukça etkili olmuştur. Alunit cevherinin kısmen de olsa amorflaşması, özellikle dehidratasyon kademesinin gerekenden daha erken sıcaklıklarda başlatmakta, bu reaksiyon için gereken aktivasyon enerjisi ise düşmektedir. Amorflaşmanın %100 oranında olmaması, daha ileri derecedeki reaksiyon kademesinde aynı aktivasyon enerjisi değerlerini gösterdiği ifade edilmiştir.

Taşkın vd. (2005a, 2005b) yaptıkları seri çalışmalar da boksit mineralinin mekanik aktivasyonu üzerinde durmuşlardır. Diasporik boksit mineraline CaO ve soda külü katkısından sonra 15 ve 30 dakika süreyle mekanik aktivasyon işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlemler sonrası elde ettikleri XRD analizi sonuçları, harmanda bulunan  $\alpha$ -kuvarz ve muskovitin yapısal kararlılığını koruduğunu, diasporit yapısında kısmen amorflaşma gerçekleştiğini, bunlara karşılık kalsit, hematit, kaolinit, soda, CaO ve  $Ca(OH)_2$  yapılarında ciddi oranda amorflaşma olduğunu ortaya koymuştur. Aktive edilmemiş boksit harmanının 600, 700 ve 800°C'de farklı sürelerdeki kalsinasyon ve oda sıcaklığındaki liç işlemleri sonrasında % 8-18 aralığında alumina elde edildiği, buna karşılık 15 dakika süreyle mekanik aktive edilmiş harmanın 800 °C'deki kalsinasyonu ve oda sıcaklığındaki liç işlemi sonrası % 70-77 aralığında alumina elde edildiği belirtilmiştir. Buradan da mekanik aktivasyon işleminin alumina kazanımını çok büyük bir hızla

arttırdığını ortaya koymuşlardır. Sasikumar vd. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada ilmenit mineralinin mekanik aktivasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada yer alan XRD analiz sonuçları incelendiğinde, öğütülmemiş mineralde var olan pseudorutiline ait piklerin, öğütme süresindeki artışa bağlı olarak azaldığı ve öğütme süresinin 240 dakikaya ulaşması ile tamamen yok olduğu belirlenmiştir.

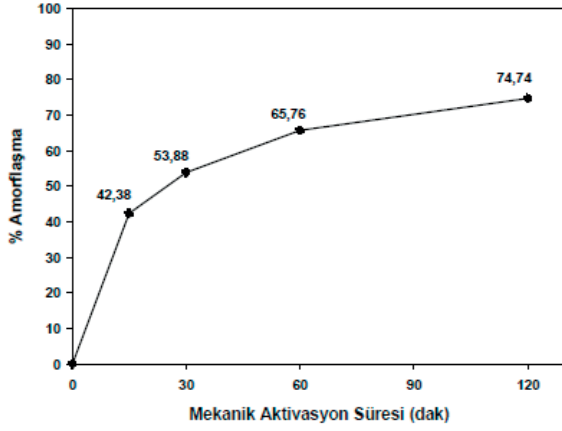
Cebeci (2007) tarafından yapılan çalışmalarda ise; Orijinal boksit ile 15', 75' ve 300' süre ile mekanik aktive edilmiş numunelerin XRD analizi tek bir grafik üzerinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Aktive edilmiş ve aktive edilmemiş boksit numunesinin pikleri karşılaştırıldığında, bütün difraksiyon pikleri, mekanik aktivasyon işleminin artan süresiyle gitgide artan oranda kısalmıştır. Bunun da nedeni boksit yapısındaki kısmi amorflaşma ve yapısal düzensizliklerin artması olarak değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile mekanik aktivasyonun mineral partiküllerinde amorflaşma sağladığı sonucuna varılmıştır.

Tromans ve Meech (1999) mekanik aktivasyon işleminin çok sayıda dislokasyon oluşumuna neden olduğunu, bunun da uzun mesafeli latis periyodikliğinde azalmaya ve ötelemelere önderlik ettiğini belirtmişlerdir. Uzayan öğütme işlemleri sonrasında XRD analiz paternlerindeki difraksiyon piklerindeki azalma ve kaybolmaların meydana gelmesiyle bu durumun yarı-kararlı bir amorf fazın oluşumu olarak sunulabileceğini de ifade etmişlerdir.

Zhang vd. (2010) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, kromit cevherinin mekanik aktivasyonu incelenmiştir. Bu çalışmada yer alan XRD analiz sonuçları incelendiğinde; öğütülmemiş mineralde düşük şiddette olan kromite ait piklerde öğütme süresindeki artışa bağlı olarak şiddetlerinde artış gözlenmiştir.

Pourghahramani (2006) benzer şekilde mekanik aktive edilmiş malzemelerde, plastik deformasyon ve kristal yapının düzensizleşmesi yani latis distorsiyonunun oluştuğunu, ayrıca latis hataları ve amorflaşmanın meydana geldiğini, yapıda dislokasyon yoğunluğunun arttığını ifade etmiştir. Pourghahramani ve Forssberg (2007) hematit üzerine yaptıkları çalışmada mekanik aktivasyonla sağlanan kristal yapısındaki değişimlerin XRD difraksiyon pikleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Burada da pik boylarında kısalma, piklerde genişleme ve bir

miktar pik kaymaları gözlenmiştir. Mekanik aktivasyon süresine bağlı olarak gerçekleşen ortalama amorflaşma miktarlarının değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir (Ercenk, 2008).



Şekil 6. Mekanik aktivasyon süresiyle alunit yapısındaki amorflaşma eğilimi (Ercenk, 2008)

Şekil 6'da görüleceği üzere 15' mekanik aktivasyon sonrasında alunit yapısında yaklaşık % 42,38'lik amorflaşma görülmektedir. Bu değer 30' mekanik aktivasyon sonrası yaklaşık % 53,88'e, 60' mekanik aktivasyon sonrası yaklaşık % 65,76'ya ve 120' mekanik aktivasyon sonrası ise yaklaşık % 74,74'lük bir değere ulaşmıştır (Ercenk, 2008). Yapıda amorflaşma olmasıyla minerallerin reaksiyona girme kabiliyetinde artış olacağı ifade edilebilir. Çizelge 1'de yapılan bu çalışmaların bir özeti verilmiştir. Ayrıca termal bozunma sırasında tanecik içinde oluşan sıcaklık profili, artan ısıtma hızı ve tanecik çapı ile artmaktadır. Tanecik çapı büyükse veya termal bozunma süresi kısa ise bu profil, işlem süresince korunmaktadır. Karbon dioksitin açığa çıkmak için geçeceği yol kısa olduğundan küçük tanecikler, büyük taneciklerden daha düşük sıcaklıklarda ve daha hızlı kalsine olma eğilimindedir. Tane boyutunun küçük olmasının diğer bir sonucu da, yüzey alanının artması ve ısı transferinin daha iyi gerçekleşmiş olmasıdır (Boynton, 1980). Sasikumar vd. (2004) tarafından yapılan bir çalışmada ilmenit mineralinin mekanik aktivasyonu incelenmiştir. Tane boyu analiz sonuçları incelenmiş ve ilmenit mineralinin tane boyunun 90' öğütme süresine kadar küçüldüğü, 90' öğütme süresinden sonra arttığı belirlenmiştir.

Pourghahramani ve Forssberg (2006) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, mekanik aktivasyonun hematit cevherinin indirgenme davranışı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Öğütücü ortam yüzey alanı (Ms) 1 m<sup>2</sup>/kg ve 4 m<sup>2</sup>/kg iken, titreşimli değirmen ile gezegensel değirmenin kullanıldığı çalışmada yer alan tane boyu analiz sonuçları incelendiğinde, Ms=1 iken hematit cevherinin tane boyunun 2 saat öğütme süresine kadar azaldığı, 2 saatten sonra değişmediği belirlenmiştir. Ancak Ms=4 olarak değiştirildiğinde, hematit tane boyunun gezegensel değirmende 1,5 saat, titreşimli değirmende ise 4 saat öğütme süresinden itibaren arttığı gözlenmiştir. Böylece daha kısa sürede istenilen tane boyutunda malzeme elde edilmiş olacak ve bu durum sürecin hızını arttıracaktır.

Alex vd. (2011) tarafından yapılan bir çalışmada ise, mekanik aktivasyon yardımı ile gibsitin böhmite sentezi incelenmiştir. Bu çalışmada yer alan tane boyu analiz sonuçları incelendiğinde, böhmite mineralinin tane boyunun 15' öğütme süresine kadar azaldığı, ancak 15' öğütme süresinden sonra arttığı belirlenmiştir.

Cebeci (2007) tarafından yapılan çalışmada, mekanik aktivasyonun boksitin termal bozulmasındaki etkisini incelemek üzere termal analizler (TG, DTG, DTA ve DSC) yapılmıştır. Halkalı değirmende ön öğütme işleminin de katkısı ile orijinal Muğla boksitinin 10 µm altı ve üstü bir tane dağılımının olduğu görülmüştür. Fakat genellikle tanelerin 10 µm ve üstü boyutlarında olduğu görülmüştür. Hâlbuki 600 devir/dakika dönme hızında 75 dakika aktivasyonu sonucu elde edilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, tanelerin oldukça ufalandığı ve tane boyut dağılımının hem daha homojen hale geldiği, hem de tamamının 10 µm altına öğütüldüğü ve pülverize hale geldiği gözlemlenmiştir. Hatta tanelerin büyük kısmının çok küçük (yaklaşık 1 µm) hale gelip aktivasyonun etkisiyle de kısmen aglomera olmaya başladığı anlaşılmaktadır.

Cebeci (2007) tarafından yapılan çalışmada, boksitin mekanik aktivasyonu çalışmalarında EDAX analizi incelendiğinde elde edilen spektrumlardan, numunede Al, Fe, Si, K, Ca, O, C ve Ti olduğu anlaşılmaktadır. Orijinal numunenin spektrumları, numunede en çok Al, O, Si ve Fe olduğunu göstermektedir. Bu elementlerin çeşitli bileşikleri, yapılan x-ray analizinde de tespit edilmiş ve bu veriler x-ray analizi tarafından doğrulanmıştır. Aynı benzer sonuç aktive edilmiş numunenin EDAX analizinde de görülmektedir.

Çizelge 1. Mekanik aktivasyon üzerine yapılan bazı çalışmaların özeti

Cevher Türü	DeneySEL Koşullar	Sonuçlar	
<b>Tungsten Karbür</b>	CaWO <sub>4</sub> ve kokun karbotermik kavurma işlemi öncesinde birlikte öğütülmesi	Karbotermik tepkime hızında belirgin artışlara yol açmıştır	Welham, 2000; Welham, 2002
<b>Sülfürlü Cevherler</b>	Mekanik aktivasyon işlemi	Oksidasyon, bozulma ve süblimleşme sıcaklıkları düşmüştür	Baláz ve Ebert, 1991
<b>Hematit Cevheri</b>	Planeteri bilyalı değirmende gerçekleştirilen mekanik aktivasyon işlemi	Hematitin hidrojen gazıyla indirgenme sıcaklığını düşürmüştür	Pourghahramani ve Forsberg, 2007
<b>Stronsiyum karbonat üretiminde kullanılan SrS</b>	Selestitin (SrSO <sub>4</sub> ) kokla birlikte öğütülerek mekanik aktivasyon işlemi	SrS'ün oluşum sıcaklığı 1100 °C'ye düşürülmüştür	Erdemoğlu ve Gock, 2009; Erdemoğlu, 2009
<b>Alunit Cevheri</b>	Orijinal ve 15' mekanik aktive edilmiş alunitin farklı ısıtma hızlarında alınan TG analizinden kinetik incelemesi	Alunit cevherinin kısmen de olsa amorflaşması, özellikle dehidratasyon kademesinin daha erken sıcaklıklarda başlaması, bu reaksiyon için gereken aktivasyon enerjisi düşürülmüştür	Küçük, 2006
<b>Boksit Cevheri</b>	Diasporik boksit mineraline CaO ve soda külü katkısından sonra 15' ve 30' süreyle mekanik aktivasyon işlemi	Muskovitin yapısal kararlılığını korumuş, diasporit yapısında kısmen amorflaşma gerçekleşmiş, bunlara karşılık kalsit, hematit, kaolinit, soda, CaO ve Ca(OH) <sub>2</sub> yapılarında ciddi oranda amorflaşma olmuş ve mekanik aktivasyon işleminin alumina kazanımını çok büyük bir hızla artırmıştır	Taşkın vd., 2005a ; Taşkın vd., 2005b
<b>İlmenit Cevheri</b>	Mekanik aktivasyon işlemi	Öğütülmemiş mineralde var olan pseudorutiline ait piklerin, öğütme süresindeki artışa bağlı olarak azaldığı ve öğütme süresinin 240' ulaşması ile tamamen yok olduğu belirlenmiştir	Sasikumar vd., 2004
<b>Kromit Cevheri</b>	Mekanik aktivasyon işlemi	Öğütülmemiş mineralde düşük şiddette olan kromite ait piklerde öğütme süresindeki artışa bağlı olarak şiddetlerinde artış gözlenmiştir	Zhang vd., 2010
<b>Hematit Cevheri</b>	Mekanik aktivasyonla sağlanan kristal yapıdaki değişimlerin X-ışını difraksiyon analizi	Pik boylarında kısalma, piklerde genişleme ve bir miktar pik kaymaları gözlemlenmiştir	Pourghahramani ve Forsberg, 2007
<b>Boksit Cevheri</b>	Orijinal boksit ile 15', 75' ve 300' süre ile mekanik aktivasyon işlemi	Boksit yapısındaki kısmi amorflaşma ve yapısal düzensizliklerin artmasına neden olmuştur	Cebeci, 2007
<b>Alunit Cevheri</b>	15', 30', 60', 120' süre ile mekanik aktivasyon işlemi	Yapıda amorflaşma olmasıyla minerallerin reaksiyona girme kabiliyetinde artış meydana gelmiştir	Ercenk, 2008



Zhao vd. (2009) tarafından yapılan bir çalışmada, mekanik aktivasyonun pirotitin liç kinetiği üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın SEM görüntüleri incelendiğinde tane boyunun öğütme süresine paralel olarak azaldığı ancak artan sürelerde agregasyonların gözlemlendiği belirtilmiştir.

Tang vd. (2010) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise, mekanik aktivasyonun kaolin liçindeki etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın SEM görüntüleri incelendiğinde, öğütülmemiş cevherde gözlenen iğne şekilli tanelerin 4 saat öğütme süresi ile kaybolduğu belirtilmiştir.

Gökteş (2013) tarafından yapılan çalışmada ise, aşırı öğütülmüş mermer tozu kuvars tozu karışımlarından optimum yapay vollastonit oluşum şartları belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda seramik testlerde kullanılmak üzere yapay vollastonit elde edilmiştir.

Çalışmanın temel konusu olan “mekanik aktivasyon” durumunu sağlamak üzere mermer atık çamuru, kuvars kumu ile birlikte öğütülmüştür. Birlikte öğütme işleminde, bilya/karışım ağırlıkça oranı ve öğütme süresi başlıca değişkenler olarak seçilmiştir. Karışımlar değişik sürelerde öğütülerek, en uygun vollastonit üretimi sağlayan öğütme koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

Mermer sanayi atık çamurlarından elde edilen tozlarla kuvars tozunun uzun süreler birlikte öğütülmesiyle ortaya çıkabilecek mekanik aktivasyon durumunun, bu malzemelerin birlikte kavrulmasıyla üretilebilen vollastonitin ( $\text{CaSiO}_3$ ) oluşum sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca, aşırı öğütülmüş karışımların kavrulmasıyla üretilen yapay vollastonitin seramik malzemelerde kullanılabilirliği de incelenmiştir. Mermer toz atıklarının farklı malzemeler üretiminde kullanılması konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalara bir katkı sağlamak üzere yapay vollastonit katkılı yer karesi örnekleri üretilmiş ve örneklerle çeşitli seramik testleri aktivasyona uğramış karışımlarla elde edilen vollastonitin seramik malzeme camı fazın oluşum sıcaklığını düşürdüğü belirlenmiştir. Dilatometre analizleriyle elde edilen bulgulara göre, en üst cam faza geçiş sıcaklığı  $700^\circ\text{C}$  olmakla birlikte; öğütülmüş karışımın kavrulmasıyla elde edilen vollastonitin ağırlıkça %5 olarak bulunduğu seramik ürünün sıcaklığa en dayanıklı malzeme olduğu belirlenmiştir. Buna göre, üretilen vollastonitin örneğin, çift pişirimli duvar karolarında ya da özellikle  $1000^\circ\text{C}$  üstü sıcaklıklara dayanıklı olması sebebiyle sırlı granit üretimi için kullanılabilirliği düşünülmüştür.

Şener ve Erdemoğlu (2014) yapmış oldukları çalışmada aşırı öğütme ile mekanik aktivasyonun etkisi ile jipsin hemihidrat (alçı) oluşturmak üzere kalsinasyon etkilerini incelemişlerdir. Jips örnekleri gezegensel değirmen yardımıyla öğütülmüş ve elde edilen örneklerin tane boyu dağılımı (PSD), özgül yüzey alanı (BET), kristal yapısı (XRD), yüzey morfolojisi (SEM), kimyasal yapısı (FT-IR), termogravimetrik (TGA) ve ısıl davranış (DSC) analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak jipsin artan öğütme süresine maruz kalması, jipsin hemihidrata, hemihidratın anhidrite ( $\text{CaSO}_4$ ) dönüşüm sıcaklıklarında düşüşe neden olmuştur. Böylece aşırı öğütmenin, jipsin ısıl dönüşümleri için gerekli özgül enerji miktarında azalmaya yol açabilecek kadar mekanik aktivasyon oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

#### 4.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Cevher hazırlama işlemlerinde öğütme, enerjinin en fazla ve en verimsiz kullanıldığı işlem basamağıdır. Özellikle, tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılarak en az enerji ile en uygun boyuta küçültme yapabilmeyen olanakları araştırılmaktadır.

Mekanik aktivasyon ise öğütme sırasında yaşanan aşınma ve yüksek enerji tüketimlerine rağmen önemini halen korumaktadır. En büyük sorunlardan biri olan aşınmayı yok etmeye çalışan jet değirmenlerde ise yüksek enerji ve düşük kapasite sorunu ortaya çıkmıştır. Endüstride çok ince boyuttaki malzemeye olan ihtiyaç gelecekte daha da artacaktır. Bunun sonucu olarak mekanik aktivasyon işleminin endüstrideki kullanımının daha da artması beklenmektedir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde cevher hazırlama işlemlerinde mekanik aktivasyon uygulamalarının mineral yapılarında amorflaşma sağlayarak bir sonraki süreçte reaksiyona girme kabiliyetinde artış sağlandığı, reaksiyon süresinde kısaltmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu gibi sonuçlar mekanik aktivasyonun bazı üstün özellikleri olup her geçen gün önemi artmakta ve çeşitli mineraller üzerinde uygulamaları devam etmektedir. Gelecekteki araştırmaların, mekanik aktivasyon uygulaması amacıyla daha ince bilya kullanan ve bu sayede daha ince ürün elde edilebilecek ekipmanlar üzerinde yoğunlaşacağı düşünülmektedir.

İşletmeler açısından ilk yatırım, işletme, enerji, tamir-bakım, işçilik gibi tesis maliyetini düşürecek mekanik aktivasyon uygulamalarında yeni teknolojilerin kullanımı; gerek işletmeciler gerekse ülkemizde mineral endüstrisi açısından önemli bir atılım olacaktır. Bu bağlamda, boyut küçültme işleminin sıkça uygulandığı endüstri dallarında uygun kırıcı ve öğütücülerin seçilmesi ve kullanılması ile maliyetler aşağı çekilecek ve böylece çevre kirlenmesinin en aza indirilmesi sağlanacaktır.

## KAYNAKLAR

Alex, T.C., Kumar, R., Roy, S.K., Mehrotra S.P., 2011. Anomalous reduction in surface area during mechanical activation of boehmite synthesized by thermal decomposition of gibbsite. *Powder Technology*, 208, 128-136.

Baláz P., Ebert, I., 1991. Oxidative Leaching of Mechanically Activated Sphalerite. *Hydrometallurgy*, 27, 141-150.

Baláz, P., 2000. *Extractive Metallurgy of Activated Minerals*. Elsevier, Science B.V., Amsterdam.

Baláz, P., 2003. Mechanical Activation in Hydrometallurgy. *Int. J. Miner. Process.* 72, 341-354.

Baláz, P., Achimovičová, M., 2006. Mechano-Chemical Leaching in Hydrometallurgy of Complex Sulphide. *Hydrometallurgy*, 84, 60-68.

Biangardi, S., Pietsch, H., 1976. Verarbeitung sulfidischer Kupfererze nach dem Lurgi-Mitterberg (LM)-Verfahren. *Erzmetall*, 29, 73-80.

Boldyrev, V.V., 2004. Ten Years After The First International Conference on Mechanochemistry and Mechanical Alloying; Where We Are Now?. *J. Mater. Sci.*, 39, 4985-4986.

Boynton, R.S., 1980. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, John Wiley and Sons., Inc., Second Edition, New York, 7-190.

Cebeci, A., 2007. Muğla Diasporitinin Termal Özelliğine Mekanik Aktivasyonun Etkisi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.*

Celep, O., Alp, İ., 2008, Karıştırmalı Değirmenler İle İnce Öğütmenin Refrakter Altın Cevherlerine Uygulanabilirliğinin İncelenmesi, *Madencilik*, 47 (3), 15-26.

Corrans, I.J., Angove, J.E., Johnson, G.D., 1995. The Treatment of Refractory Copper-Gold Ores Using ActivoxR Processing. In: *Proceedings of International Conference on "Randol Gold Forum"*, Perth, 221-224.

Ercenk, G., 2008. Mekanik olarak Aktive Edilen Alunitin Sülfürük Asit Çözeltisinde Liç Kinetiği,

Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya

Erdemoğlu, M., Gock, E., 2009. Effect of Mechanical Activation on the Carbothermic Reduction of Celestite. *Proceedings of the XIII Balkan Mineral Processing Congress*, 14-17 June, Bucharest, Romania, 200-205.

Erdemoğlu, M., 2009. Carbothermic Reduction of Mechanically Activated Celestite. *Int. J. Miner. Process.*, 92, 144-152.

Erdemoğlu, M., Ding, Y., Ghadiri, M., 2010. Intensive Milling of Siderite. 12. *Uluslararası Cevher Hazırlama Sempozyumu*, Nevşehir, Türkiye, 300-305.

Erkuş, S., 2006. Asidik Ortamda Alunitten Alumina Ekstraksiyonuna Mekanik Aktivasyonun Etkisi. *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.*

Göktaş, M., 2013. Mermer Sanayi Atıklarından Yapay Kalsiyum Silikat Üretiminde Aşırı Öğütmenin Etkilerinin Seramik Malzemeler Üzerinde Araştırılması. *Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.*

Habashi, F., 1978. *Chalcopyrite its Chemistry and Metallurgy*. McGraw Hill, NY.

Küçük, F., 2006. Mekanik Aktive Edilmiş Alunitin Termal Dekompozisyon Kinetiğinin Termogravimetri ile İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2006.

Pourghahramani, P., 2006, Effects of Grinding Variables on Structural Changes and Energy Conversion During Mechanical Activation Using Line Profil Analysis, *Licentiate Thesis*, Lulea University of Technology, Dept. of Chemical Eng. and Geosciences, Division of Mineral Processing, İsveç.

Pourghahramani, P., Forssberg, E., 2006. Microstructure Characterization of Mechanically Activated Hematite Using XRD Line Broadening. *Int. J. Mineral Processing*, 79 (2), 106-119.

Pourghahramani, P., Forssberg, E., 2007. Effects of Mechanical Activation on The Reduction Behavior of Hematite Concentrate. *Int. J. Miner. Process.*, 82, 96-105.

Sasikumar, C., Rao D.S., Srikanth S., Ravikumar B., Mukhopadhyay N.K., Mehrotra S.P., 2004. Effect of Mechanical Activation on The Kinetics of Sulfuric Acid Leaching of Beach Sand Ilmenite from Orissa, India. *Hydrometallurgy*, 75, 189-204.

Sekula, F., Baláz, P., Jusko, F., Molnár, F., Jakabský, Š., 1998. Hydrometallurgical Technology of Tetrahedrite Concentrate Processing from the Mária Mine Locality in Rozňava. In: Sasvári, T., Jancúra, M., (Eds.), *Rozňavské rudné pole. Acta Montanistica Slovaca-Monography 3*, 149-156.

- Smekal, A.G., 1952. Zum Mechanischen Und Chemischen Verhalten Von Calcitpaltflächen. *Naturwissenschaften*, 39, 428-429.
- Şener, M., Erdemoğlu, M., 2014. Jipsin Isıl Davranışına Mekanik Aktivasyonun Etkisi. *Madencilik*, 53 (3-4), 19-26.
- Tang, A., Su L., Li C., Wie W., 2010. Effect Of Mechanical Activation On Acid-Leaching Of Kaolin Residue. *Applied Clay Science*, 48, 296-299.
- Taşkın, E., 2005. Boksitten Alumina Ekstraksiyonuna Mekanik Aktivasyonunun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Taşkın, E., Yıldız, K., Alp, A., 2005a. Alkali Katkılı Boksitten Alumina Ekstraksiyonunun Mekanik Aktivasyonun Etkisi. 12. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongre ve Fuarı, İstanbul.
- Taşkın, E., Yıldız, K., Alp, A., 2005b. Mekanik Active Edilmiş Alkali Katkılı Boksit Cevherinin Karakterizasyonu. 4. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı, Sakarya.
- Thiessen, P.A., Meyer, K., Heinicke, G., 1967. *Grundlagen der Tribochemie*. Akademie Verlag, Berlin.
- Tromans, D., Meech, J.A., 1999. Enhanced Dissolution of Minerals: Microtopography and Mechanical Activation. *Minerals Engineering*, 12 (6), 609-625.
- Wang, Y., Forssberg, E., 2007. Enhancement of Energy Efficiency for Mechanical Production of Fine and Ultra-Fine Particles in Comminution. *China Particuology*, 5, 193-201.
- Welham, N.J., 2000. Mechanical Enhancement of The Carbothermic Formation of TiB<sub>2</sub>. *Metall. Trans.*, A31, 283-289.
- Welham, N.J., 2002. Activation of The Carbothermic Reduction of Manganese Ore. *Int. J. Miner. Process.*, 67, 187-198.
- Yıldız, N., 1999. *Öğütme*. Kozan ofset matbaacılık, 219 s.
- Zhang, Y., Zheng S., Du H., Xu H., Zhang Yi, 2010. Effect of Mechanical Activation on Alkali Leaching of Chromite Ore. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, 888-891.

ISSN 2564-7024



9 772564 702003