

Türker Hüdaverdi  
Özge Akyıldız

Orijinal Araştırma / Original Research

**Investigation of Blast Fragmentation Models in a Sandstone Quarry**

*Patlatma Kaynaklı Parçalanma Modellerinin Bir Kumtaşı Ocağında İncelenmesi*

Ebu Bekir Aygar  
Candan Gökçeoğlu

Orijinal Araştırma / Original Research

**Bir Tünelde Portal ve Tünel Stabilitesi İlişkisi (Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi, T3 Tüneli)**

*Portal and Tunnel Stability Relation in a Tunnel (Ankara Sivas High Speed Railway Projects, T3 Tunnel)*

Abdul Vahap Korkmaz

Orijinal Araştırma / Original Research

**Hammadde ve Klinker Öğütülebilirliklerinin Çimento Üretiminde Enerji Tüketimine Etkisinin Araştırılması**

*Investigation of the Effect of Raw Material and Clinker Grindability on Energy Consumption in Cement Production*

Ergin Gülcan  
T. Onur Dizdar  
Gizem Kocausta  
Özcan Y. Gülsoy

Orijinal Araştırma / Original Research

**Triboelektrostatik Ayırma ile İnce Boyda Kömür Zenginleştirilmesinin İncelenmesi**

*The Investigation of Fine Coal Beneficiation With Triboelectrostatic Separation*

Murat Kalkan  
Can Erenson

Orijinal Araştırma / Original Research

**Atık Elek Altı Pomza Malzemesinin Killi Zemin Ortamlarında Mühendislik Karakteristikleri Bakımından Değerlendirilmesi**

*An Evaluation of Waste Undersize Pumice Materials in Terms of Engineering Characteristics in Clayey Soils*

Sadija Kadriu  
Milaim Sadiku  
Mensur Kelmendi  
Donika Ibishi

Orijinal Araştırma / Original Research

**Determining the Drinking Water Quality in Several Rural Settlements in Ferizaj Municipality, Kosova**

*Kosova Ferzovik Belediyesi'nin Birkaç Kırsal Alanında İçme Suyu Kalitesinin Belirlenmesi*



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

Cilt / Vol: 59, Sayı / No: 3, Eylül / September, 2020

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

**Baş Editor / Editor-in-Chief**

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

**Editörler / Editors**

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

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

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

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

**Editör Yardımcıları / Editor Assistants**

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

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

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

## AMAÇ VE KAPSAM

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

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

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

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

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

## AIMS AND SCOPE

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

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

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

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

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

## **BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**

### **Scientific Mining Journal**

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

*Scientific MINING Journal is indexed or abstracted in:*

SCOPUS

Google Scholar

ULAKBİM TR Dizin

GeoRef

OpenAIRE

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

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

### **Etik Kurallar / Publication Ethics**

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

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



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

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

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

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

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

e-mail: [bilgi@madencilik.org.tr](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: Ziraat Gurup Matbaacılık Ambalaj San. ve Tic. A.Ş.*

Baskı tarihi ve saati / *Printing date: 01.09.2020 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*

BİLİMSEL  
**MADENCİLİK**  
SCIENTIFIC MINING JOURNAL **DERGİSİ**

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

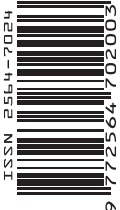
EYLÜL  
SEPTEMBER  
2020

CİLT  
VOLUME  
59

SAYI  
NUMBER  
3

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Türker Hüdaverdi  
Özge Akyıldız **145** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Investigation of Blast Fragmentation Models in a Sandstone Quarry**  
*Patlatma Kaynaklı Parçalanma Modellerinin Bir Kumtaşı Ocağında İncelenmesi*
- Ebu Bekir Aygar  
Candan Gökçeoğlu **157** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Bir Tünelde Portal ve Tünel Stabilitesi İlişkisi (Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Demiryolu Projesi, T3 Tüneli)**  
*Portal and Tunnel Stability Relation in a Tunnel (Ankara Sivas High Speed Railway Projects, T3 Tunnel)*
- Abdul Vahap Korkmaz **169** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Hammadde ve Klinker Öğütülebilirliklerinin Çimento Üretiminde Enerji Tüketimine Etkisinin Araştırılması**  
*Investigation of the Effect of Raw Material and Clinker Grindability on Energy Consumption in Cement Production*
- Ergin Gülcan  
T. Onur Dizdar  
Gizem Kocausta  
Özcan Y. Gülsoy **183** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Triboelektrostatik Ayırma İle İnce Boyda Kömür Zenginleştirilmesinin İncelenmesi**  
*The Investigation of Fine Coal Beneficiation with Triboelectrostatic Separation*
- Murat Kalkan  
Can Erenson **193** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Atık Elek Altı Pomza Malzemesinin Killi Zemin Ortamlarında Mühendislik Karakteristikleri Bakımından Değerlendirilmesi**  
*An Evaluation of Waste Undersize Pumice Materials in Terms of Engineering Characteristics in Clayey Soils*
- Sadija Kadriu  
Milaim Sadiku  
Mensur Kelmendi  
Donika Ibishi **207** Orijinal Araştırma / *Original Research*  
**Determining the Drinking Water Quality in Several Rural Settlements in Ferizaj Municipality, Kosova**  
*Kosova Ferzovik Belediyesi'nin Birkaç Kırsal Alanında İçme Suyu Kalitesinin Belirlenmesi*







Orijinal Araştırma / Original Research

## INVESTIGATION OF BLAST FRAGMENTATION MODELS IN A SANDSTONE QUARRY

### PATLATMA KAYNAKLI PARÇALANMA MODELLERİNİN BİR KUMTAŞI OCAĞINDA İNCELENMESİ

Türker Hüdaverdi<sup>a,\*</sup>, Özge Akyıldız<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TURKEY

**Geliş Tarihi / Received** : 25 Mayıs / May 2020  
**Kabul Tarihi / Accepted** : 09 Temmuz / July 2020

#### Keywords:

Aggregate quarry,  
Rock blasting,  
Fragmentation,  
Size distribution,  
Error metrics.

#### ABSTRACT

The existing blast fragmentation models were investigated in a sandstone quarry for bench blasting operations. It was tried to present different perspectives for evaluation of blast fragmentation. Size distribution curves were created for each blast. KuzRam model provided successful results. Kuznetsov-Cunningham-Ouchterlony (KCO) model was useful especially for the fine size predictions. Capability of the models for fine, mean and coarse size predictions were evaluated in detail. Uniformity coefficients proposed by the models were examined. Chung & Katsabanis model was practically tested and a modification implemented for the studied quarry. Model validation was performed using ten different error metrics. Applicability of symmetric errors and scaled errors was investigated for evaluation of blast fragmentation. KuzRam model predicted mean fragment size with an error lower than three centimeters. The results of the modified Chung & Katsabanis model is quite promise.

#### Anahtar Sözcükler:

Taş ocağı,  
Kaya patlatma,  
Parçalanma,  
Boyut dağılımı,  
Hata ölçütleri.

#### ÖZ

Parçalanma modelleri bir kumtaşı ocağında basamak patlatması operasyonları için incelenmiştir. Patlatma kaynaklı parçalanmanın değerlendirilmesi amacıyla farklı bakış açıları ortaya konmuştur. Her atım için boyut dağılım eğrileri çizilmiştir. KuzRam modelinin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. KCO modeli özellikle ince boyutlu malzemenin tahmininde başarılıdır. Modellerin yetkinliği ince, orta ve iri boyutlu malzeme miktarının tahmini açısından detaylı bir şekilde incelenmiştir. Chung ve Katsabanis modeli pratik olarak uygulanmış ve ocak için bir modifikasyon önerilmiştir. Modellerin validasyonu için on farklı hata ölçütü kullanılmıştır. Simetrik hata ve ölçekli hata ölçütlerinin parçalanmanın değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilirliği incelenmiştir. KuzRam modeli ortalama parça boyutunu üç santimetrenin altında bir hata ile tahmin edebilmektedir. Modifiye edilmiş Chung ve Katsabanis modeli de başarılı sonuçlar vermiştir.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: [hudaverdi@itu.edu.tr](mailto:hudaverdi@itu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-9326-9935>

\*\* [akyildizoz@itu.edu.tr](mailto:akyildizoz@itu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-5538-4211>

## INTRODUCTION

Rock blasting is the main rock excavation operation in open pit mines and quarries. Particle size distribution of muckpile influences all the downstream processes. Oversize blocks cannot be loaded and dumped into crusher bins. For some operations, fine materials are undesirable. Not only suitable particle size but also uniform size distribution is desired. Suitable size distribution increases crusher throughput. Blast fragmentation models are helpful tools for estimating size distribution of blast muckpile.

There are different blast fragmentation models appearing in the literature. Generally, the first target of a blast fragmentation model is to predict mean fragment size (50% passing size). Mean size is a central measure for prediction. Blast parameters are used to predict mean fragment size. Especially, main blast design parameters (burden, spacing, bench height, stemming height etc.) play important role in the determination of mean size. Some models also consider rock mass properties. In addition to mean size, sometimes, a particular characteristic size is used to define fragmentation. In second stage, a size distribution curve is constructed using a specific curve equation. Slope of the curve indicates uniformity of the distribution. Generally, models utilize blast design parameters to estimate uniformity coefficients.

Kuznetsov equation (1973) is one of the most used mean fragment size prediction formula. Larsson's formula (Larsson, 1974), SVEDEFO equation and Saroblast equation (Kou and Rustan, 1993) etc. are the samples of the other mean fragment size prediction formulas appearing in the blasting literature. KuzRam is the most well-known blast fragmentation model (Cunningham, 1983, 1987). KuzRam model relies on Kuznetsov mean size prediction equation and Rosin-Rammler size distribution curve (Rosin & Rammler, 1933; Weibull, 1951). Like the previous approaches, KuzRam model defines the 50% passing size as mean fragment size ( $x_{50}$ ). 63.2% passing size is defined as characteristics size ( $x_c$ ). The slope of the size distribution curve is characterized by the uniformity index. Uniformity index is calculated using blast parameters.

Several researchers have tried to modify KuzRam model to find solutions for the main drawbacks of

the model. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) researchers investigated crushed zone around blastholes. They examined origin of the fine material. (Kanchibotla et al., 1999; Djordjevic, 1999). Chung and Katsabanis (C&K) Model (2000) is a modification of original KuzRam model. C&K Model calculates 80% passing size ( $x_{80}$ ) and defines the uniformity index using 80% passing size and mean fragment size ( $x_{50}$ ). Chung and Katsabanis (2000) also modified Kuznetsov's mean fragment size prediction equation. KCO model is relatively new. KCO model utilizes Kuznetsov equation to predict mean fragment size, however, it uses Swebrec function to construct size distribution curve. (Ouchterlony, 2005a). Ouchterlony claims that KCO model solves two main problems related to KuzRam model: poor prediction ability in the fines range and upper limit cut off block sizes.

KuzRam model has been applied by several researchers. However, KCO model generally been practiced by the model's creators. A comprehensive site application for C&K model has not been reported. The aim of this paper is the application of the aforementioned fragmentation models to a particular case. The models were used in a sandstone quarry. The results of the models were compared to each other. It was tried to present different perspectives for evaluation of blast fragmentation. Also, C&K model was modified considering the results obtained. The aim was to make the C&K model operative. Models were also compared by using different error metrics. In addition to mean and percent errors, applicability of symmetric errors and scaled errors was investigated for evaluation of blast fragmentation.

In the following pages, the site measurements performed in a quarry are explained. Blast fragmentation models are introduced and differences among models are discussed. The measured size distribution curves and the prediction of the fragmentation models are compared. Prediction capability of the models for mean size, coarse size and fine size fractions is examined in detail. In the section three, ten different error metrics are applied to calculate the forecasting errors. Finally, the discussion and conclusion parts give a brief summary and critique of the findings.

## 1. A SUMMARIZED EXPLANATION OF BLAST FRAGMENTATION MODELS

### 1.1. KuzRam Model

Kuznetsov equation (1973), which is the starting point of KuzRam Model, is the very first formula that makes it possible to calculate average fragment size using blast design parameters. Kuznetsov formula is presented as follow:

$$x_{50} = A \times \left(\frac{V_0}{Q_e}\right)^{0.8} \times Q_e^{0.167} \times \left(\frac{115}{E}\right)^{0.633} \quad (1)$$

where  $x_{50}$  is average fragment size (cm),  $A$  is the rock factor (7 for medium rock, 10 for hard highly fissured rock, and 13 for hard weakly fissured rocks),  $V_0$  is the rock volume broken per hole ( $m^3$ ),  $Q_e$  is the mass of explosive per hole (kg) and  $E$  is the relative weight strength of explosive to ANFO.

Rosin-Rammler function is used to construct particle size distribution of blasted material (Cunningham, 1983). The function is expressed in the form:

$$R = e^{-\left(\frac{x}{x_c}\right)^n} \quad (2)$$

where  $R$  is the proportion of the material retained on the screen (%),  $x_c$  is the characteristic size,  $x$  is the screen size (cm) and  $n$  is the uniformity index. The characteristic size is defined as 63.2% passing size. If the characteristic size ( $x_c$ ) is known, size distribution curve can be drawn:

$$x_c = \frac{x}{\sqrt[4]{0.693}} \quad (3)$$

Cunningham (1983, 1987) proposed a uniformity equation considering blast design parameters. Uniformity index ( $n$ ) is given by:

$$n = 1.1 \times \left[2.2 - 14 \times \left(\frac{B}{D}\right)\right] \times \left(\frac{1+S}{2}\right)^{0.5} \times \left(1 - \frac{W}{B}\right) \times \left(\frac{L}{H}\right) \quad (4)$$

In Eq. 4,  $D$  is the hole diameter (mm),  $B$  is the burden (m),  $S$  is the spacing between adjacent holes (m),  $W$  is the standard deviation of drilling accuracy,  $L$  is the hole length (m),  $H$  is the bench height (m).

Cunningham (1987) also suggested an equation to estimate the rock factor  $A$  more precisely. This suggestion was made based on the Lilly's Blastability Index (Lilly, 1986):

$$A = 0.06 \times (RMD+JPS+JPO+RDI+HF) \quad (5)$$

where  $RMD$  is the rock mass description,  $JPS$  is the joint plane spacing,  $JPO$  is the joint plane orientation,  $RDI$  is the rock density influence,  $HF$  is the hardness factor. Cunningham (2005) also made a review on rock factor and KuzRam approach 20 years after the creation of the model.

### 1.2. Chung & Katsabanis (C&K) Model and The Modification

Chung & Katsabanis (2000) suggested that delay time and distribution of explosive in rock mass should be considered when calculating the mean fragment size. They recommended different formulas which can be assumed as an extended KuzRam Model. Chung & Katsabanis cited Stagg and Rhol (1987) and concluded that delay time has a critical effect but after a certain point there is no a remarkable change in the fragmentation. Therefore, they removed the delay time parameter from the model. In C&K model, mean fragment ( $x_{50}$ ) size is given by:

$$x_{50} = A Q_e^{-1.193} B^{2.461} (S/B)^{1.254} H^{1.266} \quad (6)$$

Chung and Katsabanis (2000) also suggested new formulas for 80% passing size ( $x_{80}$ ), characteristic size ( $x_c$ ) and uniformity index ( $n$ ):

$$x_{80} = 3 A Q_e^{-1.073} B^{2.43} (S/B)^{1.013} H^{1.111} \quad (7)$$

$$x_c = e^{0.565 \ln x_{50} + 0.435 \ln x_{80}} \quad (8)$$

$$n = 0.842 (\ln x_{80} - \ln x_{50}) \quad (9)$$

As seen in Eq. 9, uniformity index is calculated using  $x_{50}$  and  $x_{80}$  passing size. A brief discussion about C&K Model was made by Ouchterlony (2003).

In this research, a modification was implemented based on the site measurements. The calculated uniformity index of C&K model is considered low. Original uniformity index equation (Eq. 9) is multiplied by "2". Modified uniformity index ( $n'$ ) is given by:

$$n' = 2 [0.842 / (\ln x_{80} - \ln x_{50})] \quad (10)$$

From this point forward, modified C&K Model is referred as "Mod. C&K". Original and modified

C&K models are also compared and discussed in the upcoming parts of the paper.

### 1.3. KCO Model

Ouchterlony (2005a) claimed that KuzRam model was not enough to define the fine and coarse size fractions. He suggested a new approach called KCO Model. In this model, mean fragment size is calculated by Kuznetsov equation. Swebrec function is used to determine size distribution curve. Swebrec function is presented as:

$$R_m = 1/[1 + (\ln \frac{x_{max}}{x} / \ln \frac{x_{max}}{x_{50}})^b] \quad (11)$$

where  $x_{max}$  is the maximum fragment size (cm),  $x$  is the screen size and  $b$  is the curve undulation parameters. Curve undulation parameter is expressed by:

$$b = \left[ 2 \ln 2 \ln \left( \frac{x_{max}}{x_{50}} \right) \right] n \quad (12)$$

Detailed structure of KCO model was presented by two research papers published in 2005. (Ouchterlony, 2005 a, b). The Swebrec function used in KCO model was also further analyzed by Sanchidrián et al. (2014). WipFrag image analysis software also contains KCO model in its Blastcast Module (Wipfrag, 2016).

## 2. SITE MEASUREMENTS

Site measurements were conducted in a sandstone quarry in Istanbul Kemerburgaz region as a part of a graduate study performed in Istanbul Technical University Mining Engineering Department (Akyıldız, 2015). The yearly production capacity of the quarry is 6 000 000 tons. The rock structure of the region is referred to as Trakya formation. Carboniferous-aged Trakya formation is commonly exposed in the European side of Istanbul (Tugrul and Undul, 2006). The formation mainly consists of sandstone, shale, siltstone and mudstone sediments. Sandstone is the most common rock type in this formation and limestone and conglomerate interbeds or lenses are found between layers. Trakya formation is of marine origin and very intensely folded, fractured, and weathered (Tugrul and Undul, 2006).

The excavated material in Akdaglar quarry is dark

grey, green or brown, thick-bedded sandstone. Sandstone contains 60% silicium. The physical and mechanical properties of the rock are given in Table 1. The blasts were measured in the eastern part of the quarry. The rock mass properties were meticulously examined. Tectonic deformations are very common in the studied quarry benches. Joints, folding and laminations are easily observed. The apparent in-situ block size of the benches was analyzed by WipJoint joint analysis software. WipJoint allows users to quantify bench characteristics such as joint orientation, spacing and in-situ block size. Mean fracture spacing in the blast faces is 1.15 m with a standard deviation of 0.69 m. The joint aperture is between 0.1 and 1 mm. The blastability of rock mass was examined based on suggestion of Kuznetsov (1973) and Cunningham (1987). The rock factor (A) was calculated as between 7 and 7.5 for the studied benches. The fractured sandstone can be evaluated as medium rock considering blastability. Also, the examined blasting operations in the quarry have indicated that the rock shows an average resistance to blasting.

Table 1. Physical and mechanical properties of the rock

Density (g/cm <sup>3</sup> )	2.70
The Mohs hardness	5-6
Average porosity (%)	1.03
Compressive Strength (MPa)	77.5
Tensile Strength (MPa)	5.60
Young modulus (GPa)	16.9

Totally 18 blast measurements were considered in this study. The diameter of the drill hole is 89 mm in the quarry. The main explosive used is ANFO. Primer explosive is emulsion type. Millisecond electrical and non-electrical detonators are used to initiate the blast holes. All the measured design parameters are presented in Table 2. The size distribution of the measured muckpiles is determined by WipFrag image analysis software. A sample image taken from blast muckpile is presented in Figure 1. In each blast, several images were captured from different location of blast muckpile. The images were analyzed separately and results were merged to construct final size distribution curves of the blast muck piles.



Table 2. Measured blast design parameters

Blast No	B (m)	S (m)	H (m)	T (m)	Hc	L (m)	Qe (kg/hole)	Pf (kg/m <sup>3</sup> )
1	2.2	2.5	8.0	3.0	5.5	8.5	29.1	0.66
2	1.8	2.0	8.0	3.0	5.5	8.5	29.1	1.01
3	2.5	2.8	7.5	3.0	5.0	8.0	26.4	0.50
4	1.8	2.3	6.5	3.0	4.0	7.0	21.1	0.79
5	2.5	2.5	6.0	2.5	4.0	6.5	21.1	0.56
6	2.6	3.0	10.0	3.0	7.5	10.5	39.6	0.51
7	2.0	2.5	6.5	2.5	4.5	7.0	23.8	0.73
8	2.5	2.8	6.5	2.5	4.5	7.0	23.8	0.52
9	2.0	2.5	7.0	2.5	5.0	7.5	26.4	0.76
10	2.5	3.0	10.0	4.0	6.5	10.5	34.4	0.46
11	2.0	2.5	8.0	2.5	6.0	8.5	31.7	0.79
12	2.0	2.5	7.0	2.5	5.0	7.5	26.4	0.76
13	2.0	3.0	8.0	3.0	5.5	8.5	29.1	0.61
14	2.0	2.5	7.0	3.0	4.5	7.5	23.8	0.68
15	2.0	2.5	8.0	2.5	6.0	8.5	31.7	0.79
16	2.5	2.5	7.0	3.0	4.5	7.5	23.8	0.54
17	2.2	2.8	6.0	2.5	4.5	7.0	23.8	0.64
18	2.5	3.0	7.0	3.0	4.5	7.5	23.8	0.45

B: Burden, S: Spacing between holes, H: Bench height, T: Stemming, Hc: Charge Height, L: Hole length, Qe: Explosive charge per hole, Pf: Specific charge

The results of the image analysis were compared to the blast fragmentation models.

The same approach was employed by several researchers. Formerly, Gheibie et al. (2009) compared the results of image analysis and KuzRam model. Hudaverdi et al. (2012) evaluated the mean fragment size values obtained by image analysis and the Kuznetsov equation.

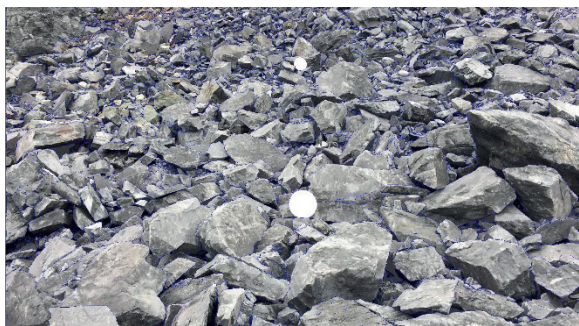


Figure 1. A sample image taken from blast muckpile

### 3. EVALUATION OF THE FRAGMENTATION MODELS

#### 3.1. Size Distribution Curves

Figure 2 shows particle size distribution curves for selected six sample blasts. The size distribution curves of the KuzRam, KCO, C&K and Mod. C&K models were drawn for each blast. Mostly the shapes of KuzRam and WipFrag curves are similar. The predictions of C&K model are excessive in the fine and coarse end of the curves due to its low uniformity index value. Modified C&K model (Mod. C&K) created more suitable curves for our case. Generally, the amount of the fine material predicted by KCO model is higher than the KuzRam predictions and WipFrag measurements. The results of the models are more similar for coarse size fractions (around + 20 cm for our case). The amount of the coarse material calculated by KCO model is relatively lower than those of the other models. Uniformity index is the key parameter to understand the shape of the curves.

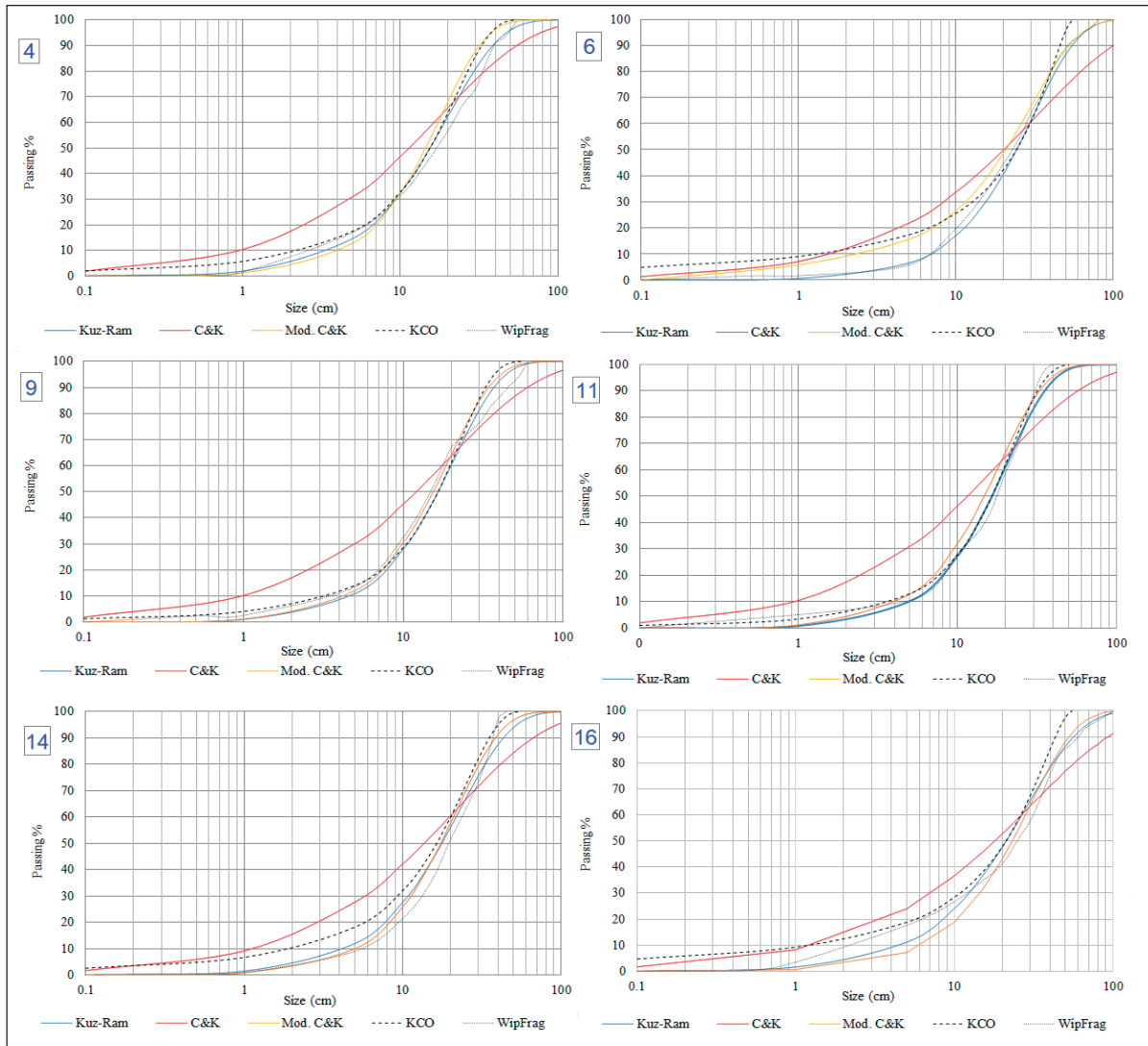


Figure 2. Size distribution curves belonging to the measured blasts

### 3.2. Fine, Mean and Coarse Size Predictions

The calculated and measured uniformity coefficients are presented in Figure 3. Uniformity coefficients determine the shape of particle size distribution curves. Mean uniformity index value ( $n$ ) for WipFrag measurements is 1.50 with a standard deviation of 0.153. Uniformity index of KuzRam tends to vary less than WipFrag uniformity index values. The calculated mean uniformity index for KuzRam model is 1.43 with a standard deviation of 0.11. The uniformity index of C&K model is almost constant. KCO model names the uniformity coefficient as curve undulation parameter ( $b$ ). Variation in curve undulation parameter is relatively high. Curve undulation parameters ( $b$ ) range between 1.08

and 2.93. Note that the uniformity index of Mod. C&K model is twice higher than that of original C&K model.

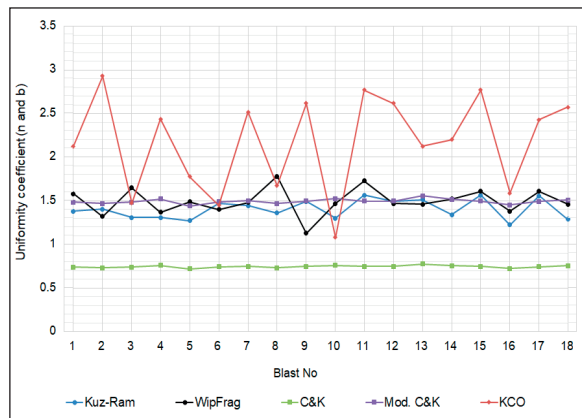


Figure 3. Comparison of the uniformity coefficients

The measured  $x_{50}$  values using WipFrag and the predicted  $x_{50}$  values by the models are presented in Figure 4. Mean size, also called median size by some researchers, is a central measure for blast fragmentation. Generally,  $x_{50}$  values are close to each other.  $x_{50}$  prediction of C&K model is smaller than that of KuzRam and WipFrag. The  $x_{50}$  values of Mod. C&K model are very close to those of the other models. Mod. C&K model apparently made better predictions than the original one. Particularly for the blasts 6, 9, 11 and 15, KuzRam predictions and WipFrag measurements are very close. It should be reminded that  $x_{50}$  predictions of C&K model is performed by using a slightly modified Kuznetsov Equation. Both KuzRam and KCO models use same Kuznetsov equation to calculate mean fragment size. Therefore, the predictions of KuzRam model in Figure 4 also represents KCO model.

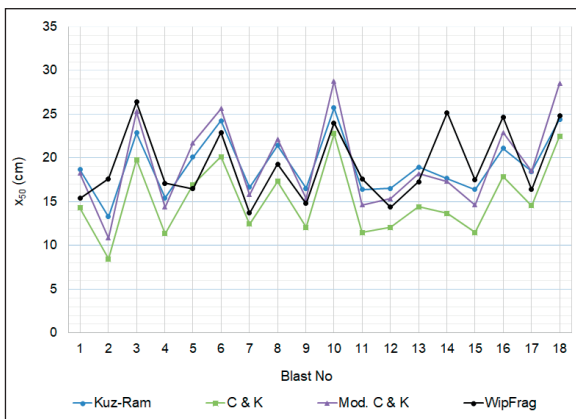


Figure 4. Predicted  $x_{50}$  values for the blast fragmentation models and WipFrag

Characteristics size (63.2% passing size,  $x_c$ ) is a fundamental parameter in KuzRam model. It is also used in C&K model. Figure 5 shows the calculated and measured  $x_c$  values. The calculated  $x_c$  values are more similar than the  $x_{50}$  values given in Figure 4. Particularly for the Blasts 1, 9, 11 and 12, calculated  $x_c$  values by the models are very close to each other. Mean  $x_c$  measured by WipFrag is 24.03 cm with a standard deviation 5.50 cm. The highest  $x_c$  was calculated for Mod. C&K model. The average  $x_c$  for Mod. C&K is 26.06 cm with a standard deviation of 7.33 cm.

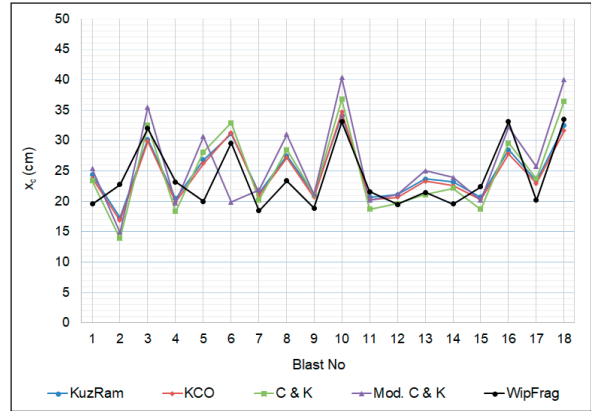


Figure 5. Predicted characteristic size ( $x_c$ ) values for the examined blasts

Figure 6 was created to examine the 20% passing size predictions of the fragmentation models. Largest differences among models occur in 20% passing size ( $x_{20}$ ).  $x_{20}$  is the indicator of the amount of the fine material. The calculated 20% passing size values for KCO model are smaller than those of KuzRam model and WipFrag measurements. In other words, KCO model estimates the amount of the fine material higher than that of KuzRam model and WipFrag. It is obvious that, generally the 20% passing size calculation of C&K model is excessive. Modified C&K Model gives more accurate results (Figure 6). For very fine size, the differences among KCO and other models are more visible. For example, for Blast 8, the amount of -1 cm material is measured as 1.70% using WipFrag software. However, it is 9.05% for KCO model. -1 cm fraction is measured as 1.92% for Blast 4. It is calculated as 5.72% by KCO model.

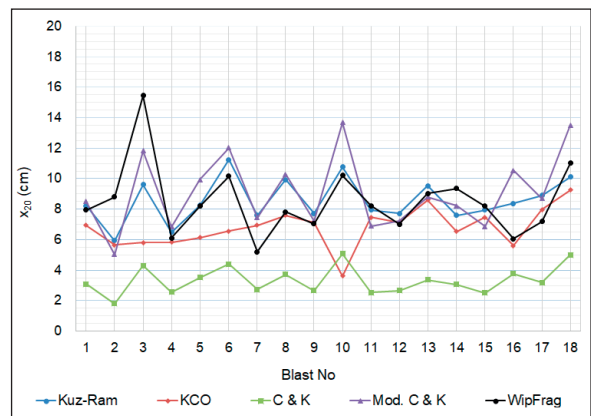


Figure 6. Comparison of the 20% passing size for each blast

80% passing size ( $x_{80}$ ) may be reviewed to examine the coarse end of the size distribution curves (Figure 7). 80% passing size is widely used for evaluation of coarse fractions in blasting literature. It is named as 80% feeding size in the Third Theory of Comminution developed by Bond (1952). Bond communication model estimates energy requirements to reduce fragments from an 80% feed size to an 80% product size. The measured and predicted  $x_{80}$  values are very close each other especially for Blasts 9, 11, 13 and 14 (Figure 7). Average  $x_{80}$  is 33.48 cm with a standard deviation of 9.48 cm for WipFrag measurements. The lowest mean  $x_{80}$  value is 31.96 cm with a standard deviation of 6.58 cm for KCO model. As seen in Figure 7, the coarse size prediction of original C&K model is excessive.

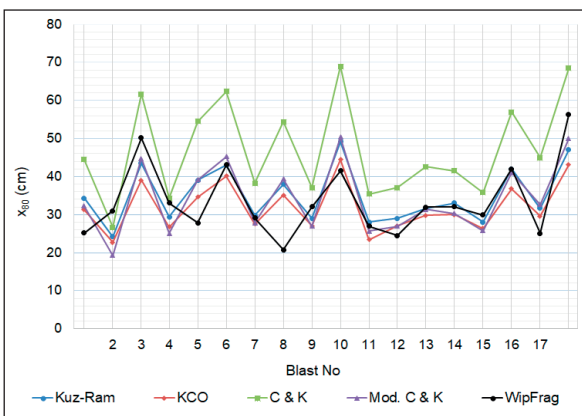


Figure 7. Comparison of the 80% passing size for each blast

### 3.3. Model Validation Using Error Metrics

Model validation is as important as model development stage. Generally, researchers consider a limited number of error measures for model validation. Actually, each error metric has some drawbacks. Ten different error measures were applied to determine prediction capability of the fragmentation models. It was aimed to perform a comprehensive model validation. All the used error measures were presented in Table 3. Absolute errors are largely used by engineers. They are easy to calculate. However, these errors are scaled dependent and they cannot be used to compare different series (Shcherbakov et al, 2013). Percentage errors show the error

magnitude as a percentage and they are very popular among non-expert users. Percentage errors are non-symmetrical and largely affected by extreme values. Symmetric errors proposed to solve asymmetry problem of percentage errors (Armstrong and Collopy, 1992). Scaled errors are relatively new error measures (Table 3). They were developed to solve scale dependency problem and to create a symmetrical error metrics (Hyndman and Koehler, 2006). Table 4 shows calculated error values for  $x_{20}$ ,  $x_{50}$  and  $x_{80}$  predictions. The predictions of fragmentation models were compared to WipFrag measurements. The mean absolute errors of KuzRam and Mod. C&K model are lower than 2 cm for 20% passing size ( $x_{20}$ ). Especially MAPE value of KuzRam model is very low, 16.15%. MAE, sMAPE and MASE values of Mod. C&K model are better than those of KCO model. However, according to median error values, KCO model performed better than Mod. C&K model for 20% passing size (Table 4). For  $x_{50}$  predictions, the calculated MAPE values of KuzRam, KCO and Mod. C&K models are lower than 20 percent. The calculated MAE and MASE values for KuzRam and KCO models are 2.56 cm and 0.28, respectively. It should be noted that KuzRam and KCO models both use Kuznetsov equation to predict mean fragment size. Mod. C&K model clearly performed better than original C&K model except median absolute error.

For 80% passing size predictions, KuzRam has lowest MAE and MdAE values. However, RMSE and RMSPE values of KCO model are slightly lower than those of KuzRam model (Table 4). Mod. C&K model performed better than KCO model according to only two median error values. MdAPE and sMdAPE values of Mod. C&K model are 12.47 and 13.31, respectively.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

KuzRam is the most applied model in the blasting literature. Its main deficiency is the inadequate estimation of the fine size fractions. According to some researchers, KuzRam neglects fine material. It well predicts coarse fraction of size distribution curve. However, KuzRam has been proved itself by many industrial and experimental applications through the years. Even in recent

Table 3. Applied error measures

Class	Error Type	Formula
Absolute Error	Mean Absolute Error	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  m_i - p_i $
	Median Absolute Error	$MdAE = \text{median}_{i=1,n}  m_i - p_i $
	Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - p_i)^2}$
Percentage Error	Mean Absolute Percentage Error	$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ m_i - p_i }{m_i}$
	Median Absolute Percentage Error	$MdAPE = 100 \text{median}_{i=1,n} \frac{ m_i - p_i }{m_i}$
	Root Mean Square Percentage Error	$RMSPE = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_i - p_i}{m_i}\right)^2}$
Symmetric error	Symmetric Mean Absolute Percentage Error	$sMAPE = \frac{200}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ m_i - p_i }{m_i + p_i}$
	Symmetric Median Absolute Percentage Error	$sMdAPE = 200 \text{median}_{i=1,n} \frac{ m_i - p_i }{m_i + p_i}$
Scaled Error	Mean Absolute Scaled Error	$MASE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ m_i - p_i }{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n  m_i - m_{i-1} }$
	Root Mean Square Scaled Error	$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ m_i - p_i }{\frac{1}{n-1} \sum_{i=2}^n  m_i - m_{i-1} }\right)^2}$

$m_i$  = Measured fragment size (cm),  $p_i$  = Predicted fragment size (cm),  $n$  = Case number  
 $\overline{m_i}$  = Mean measured fragment size

Table 4. Calculated error values for  $x_{20}$ ,  $x_{50}$  and  $x_{80}$  predictions

	Absolute error			Percentage error			Symmetric error		Scaled error		
	MAE	MdAE	RMSE	MAPE	MdAPE	RMSPE	sMAPE	sMdAPE	MASE	RMSSE	
$x_{20}$	KuzRam	1.37	0.81	1.94	16.15	9.88	21.39	15.87	9.41	0.15	0.21
	C&K	5.17	4.99	5.51	59.80	59.59	60.56	86.63	84.92	0.56	0.60
	Mod. C&K	1.85	1.62	2.25	22.40	19.67	28.34	20.90	18.40	0.20	0.25
	KCO	2.01	0.90	3.17	20.39	11.80	27.95	24.93	11.93	0.22	0.35
$x_{50}$	KuzRam	2.56	2.09	3.01	13.58	12.09	15.42	13.67	11.40	0.28	0.33
	C&K	4.05	2.77	5.05	20.65	16.48	24.97	24.50	17.96	0.44	0.55
	Mod. C&K	3.05	2.79	3.62	15.89	15.33	18.50	16.27	14.24	0.33	0.40
	KCO	2.56	2.09	3.01	13.58	12.09	15.42	13.67	11.40	0.28	0.33
$x_{80}$	KuzRam	5.06	4.09	6.82	17.37	12.17	26.32	15.32	12.97	0.55	0.74
	C&K	13.98	11.84	16.39	46.36	32.19	59.46	34.63	27.73	1.53	1.79
	Mod. C&K	5.81	5.26	7.42	19.86	12.47	28.66	18.26	13.31	0.63	0.81
	KCO	5.69	4.76	6.81	18.01	14.45	22.99	17.51	15.49	0.62	0.74



years, several researchers have practiced the KuzRam model or adapted–modified it for particular cases (Gheibie et al., 2009; Badroddin et al., 2013; Tosun et al., 2014). In general terms, KuzRam model and WipFrag produced similar results for our case study.

KCO model uses a new function to construct size distribution curve. It also introduces an upper limit to the fragment size ( $x_{max}$ ). KCO model does not require any complex parameters. Ouchterlony (2005a) claims that KCO model increase predictive capability for the fines range. For our cases, amount of the fine material calculated by KCO is higher than that of KuzRam and WipFrag as expected (Figure 6). Except the fine fraction of the size distribution curves, the results of WipFrag and KCO are similar. KCO model should be considered especially if fine size fractions are important for mining process.

C&K model is an extension of KuzRam. This approach was created using model-scale blasts. A limited site application has been reported. Application of C&K model to the studied quarry was unsuccessful because of low uniformity index values. Main difference between C&K and KuzRam model is the calculation of the uniformity index. Formulation of C&K uniformity index is simpler than that of KuzRam model. However, for our case, main drawback of C&K model was also uniformity coefficient. It was provided too low uniformity values. C&K model was modified by multiplying the uniformity index by 2. For future applications, it is expected that the uniformity index of Mod. C&K model ( $n\phi$ ) will be 2-2.5 times higher than that of original C&K model. It is believed that Mod. C&K model may be helpful as an alternative for KuzRam model. However, it should be practiced in various mines to increase its reliability.

Ten different error metrics were used to evaluate prediction capability of the models. Blast researchers tend to use mean errors for validation. The calculated median errors are lower than mean errors. Mean and median errors should be considered together to make a decision. Symmetric errors and scaled errors are found to be very useful for evaluation of blast fragmentation. The interpretation of symmetric errors are slightly difficult in comparison to percentage errors. The

range of scaled errors is quite narrow. For example, the calculated MAE values for KuzRam and Mod. C&K models are 1.37 and 1.85, respectively for  $x_{20}$  prediction. However, the scaled error values are 0.21 and 0.25.

Each blast fragmentation model explained in this paper considers different parameters to construct size distribution curve. Blast fragmentation is a very complex process. Researchers should be skeptical and use different models simultaneously. In this paper, a quarry application of the fragmentation models was discussed. Generally, quarries use small diameter blasthole. Therefore, burden, spacing between holes, and charge weight per hole are low. Also, quarries works with low benches. Interestingly, Kuznetsov equation, which is the fundamental parameter of the most fragmentation models, was also created in a quarry. In the future, attempts should be made to apply the fragmentation models to open pit mines, which operate using large diameter drill hole. That helps to understand the efficiency of the models for high benches with large burden and spacing values.

The capability of the models should be tested for specific or extreme rock conditions (very soft or hard-competent rocks). The researchers should not avoid modifying or adapting the models for their mines if needed. Models may be calibrated based on the experience of site workers. All the models assume that ideal explosive detonation occurs in the site. Performance of the explosive should be monitored especially for blended blasting agents like ANFO. In a wet blasthole, the performance of dry blasting agents may vary. Prediction accuracy of the models will be insufficient if there is no an ideal detonation in blast site.

## REFERENCES

- Akyıldız, Ö., 2015. Investigation of Blast Fragmentation Models in Sandstone Quarries, MSc Thesis (In Turkish). Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering and Technology.
- Armstrong, J. S., Collopy, F., 1992. Error Measures for Generalizing About Forecasting Methods: Empirical Comparisons. *International Journal of Forecasting*, 8 (1), 69-80.

- Badroddin, M., Bakhtavar, E., Khoshrou, H., Rezaei, B., 2013. Efficiency of Standardized Image Processing in The Fragmentation Prediction In The Case of Sungun Open-Pit Mine. *Arabian Journal of Geosciences*, 6 (9), 3319–3329.
- Bond, F. C., 1952. The Third Theory of Comminution. *Transactions on AIME Mining Engineering*, 193, 484-494.
- Chung, S. H., Katsabanis, P. D., 2000. Fragmentation Prediction Using Improved Engineering Formulae. *Fragblast*, 4 (3-4), 198-207.
- Cunningham, C. V. B., 1983. The KuzRam Model for Prediction of Fragmentation From Blasting. In: *Proceedings of 1st International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Lulea, Sweden, 440-453.
- Cunningham, C. V. B., 1987. Fragmentation Estimations and KuzRam Model – Four Years On. In: *Proceedings of 2nd Int. Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Keystone, Colorado, 475-487.
- Cunningham, C. V. B., 2005. The Kuz-Ram Fragmentation Model – 20 Years On. In: *Proceedings of The EFEE 5th World Conference on Explosives and Blasting*, European Federation of Explosives Engineers, Brighton, 201-210.
- Djordjevic, N., 1999. Two-Component Model of Blast Fragmentation. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, SAIMM, Johannesburg, 213–219.
- Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie S. H., Pourrahimian, Y., 2009. Modified Kuz—Ram Fragmentation Model and Its Use at the Sungun Copper Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46 (6), 967–973.
- Hüdaverdi, T., Kuzu, C., Fisne, A., 2012. Investigation of the Blast Fragmentation Using The Mean Fragment Size and Fragmentation Index. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 56, 136–145.
- Hyndman, R. J., Koehler, A. B., 2006. Another Look at Measures of Forecast Accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22 (4), 679–688.
- Kanchibotla, S. S., Valery, W., Morrell, S., 1999. Modelling Fines In Blast Fragmentation and Its Impact on Crushing and Grinding. In: *Proceedings of the Explo'99: A Conference on Rock Breaking*, Kalgoorlie, WA, 137-344.
- Kou, S., Rustan, A., 1993. Computerized Design and Result Prediction of Bench Blasting. In: *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Vienna, Austria, 263-271.
- Kuznetsov, V. M., 1973. Mean Diameter of Fragments Formed by Blasting Rock. *Soviet Mining Science*, 9 (2), 144–148.
- Larsson, B., 1974. Report on Blasting of High and Low Benches – Fragmentation From Production Blasts. In: *Proceedings of The Swedish Rock Construction Committee Discussion Meeting BK 74*, Stockholm, 247-273.
- Lilly, P. A., 1986. An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability. In: *Proceedings of the Large Open Pit Mining Conference*, Victoria, Australia, 89–92.
- Ouchterlony, F., 2003. Influence of Blasting on the Size Distribution and Properties of Muckpile Fragments, A State-Of-The-Art Review, MinFo project P2000-10: Energy Optimization in Comminution. *Swebrec*, Luleå University of Technology, Sweden, p. 27
- Ouchterlony, F., 2005a. The Swebrec© Function: Linking Fragmentation by Blasting and Crushing. *Mining Technology*, 114 (1), 29-44.
- Ouchterlony, F., 2005b. What Does the Fragment Size Distribution of Blasted Rock Look Like? In: *Proceedings of the 3rd EFEE World Conference on Explosive and Blasting*, Brighton, 189-199.
- Rosin, P., Rammler, E., 1933. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. *Journal of the Institute of Fuel*, 7, 29–36.
- Sanchidrián, J.A. Ouchterlony, F., Segarra, P., Moser, P., 2014. Size Distribution Functions for Rock Fragments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 381–394.
- Shcherbakov, M. V., Brebels, A., Shcherbakova, N. L., Tyukov, A. P., Janovsky, T. A., Kamaev, V. A., 2013. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Science Journal*, 24, 171–176.
- Stagg, M. S., Rholl, S. A., 1987. Effects of Accurate Delays on Fragmentation for Single-Row Blasting In A 6.7 M (22-Ft) Bench. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Keystone, Colorado, 210-223.
- Tosun, A., Konak, G., Toprak, T., Karakus, D., Onur, A. H., 2014. Development of the Kuz-Ram Model to



Blasting in a Limestone Quarry. *Archives of Mining Sciences* 59 (2), 477–488.

Tugrul, A., Undul, O., 2006. Engineering Geological Characteristics of Istanbul Greywackes. In: *Proceedings of the 10th International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Congress*, Nottingham, United Kingdom, 395.

Weibull, W., 1951. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 18, 293–297.

WipFrag Operating Manual, 2016. WipWare Inc., Ontario, Canada.



Orijinal Araştırma / Original Research

## BİR TÜNELDE PORTAL VE TÜNEL STABİLİTESİ İLİŞKİSİ (ANKARA-SİVAS YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU PROJESİ, T3 TÜNELİ)

*PORTAL AND TUNNEL STABILITY RELATION IN A TUNNEL (ANKARA SİVAS HIGH SPEED RAILWAY PROJECTS, T3 TUNNEL)*

Ebu Bekir Aygar<sup>a,\*</sup>, Candan Gökçeoğlu<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Fugro Sial Yerbilimleri Müşavirlik ve Mühendislik Ltd Şti., Çankaya, Ankara, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 14 Nisan / April 2020

**Kabul Tarihi / Accepted** : 10 Mayıs / May 2020

### ÖZ

#### Anahtar Sözcükler:

Tünel,  
 Yenilme,  
 Portal,  
 Nümerik analiz.

Son yıllarda hızlı bir gelişim gösteren ulaşım ağı projeleri kapsamında inşa edilen tünellerin en çok karşılaşılan sorunlarından biri portal şevlerinin duraylılığıdır. Portal şevlerinde meydana gelen yenilmeler zaman zaman tünelde de duraylılık problemlerine sebep olmakta ve sorunu büyütülmektedir. Bu çalışma kapsamında, buna tipik bir örnek olan Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren projesi kapsamında inşa edilen T3 Tünelinde meydana gelen yenilme incelenmektedir. Tünel kazısı devam ederken, çıkış portal kesimi şevlerinde çatlaklar meydana gelmiş ve aynı zaman da tünel gövdesinde de göçük meydana gelmiştir. Bu çalışma kapsamında hem göçen kesimin güvenle tekrar kazılması için sayısal analizler ile önerilen yeni destek sistemleri değerlendirilmekte, hem de portal kesiminde şev duraylılığının sağlanması için gerekli analizlerin yapılması ve sonuçların performansı tartışılmaktadır. Buna ek olarak, çalışmada genel olarak tünel portal kazısı ile tünel içi tahkimat sistemlerinin etkileşimi tanımlanarak, bu tür tünel çalışmalarını için bir prosedür önerilmektedir.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Tunnel,  
 Failure,  
 Portal,  
 Numerical analysis.

One of the most frequent problems of tunnels built within the scope of transportation network projects, which has been developing rapidly in the recent years, is the stability of portal slopes. The failures occurring in the portal slopes sometimes result in stability problems in the tunnel and increase the problem. Within the scope of this study, the failure in the T3 Tunnel built within the scope of the Ankara-Sivas High Speed Train project, which is a typical example, is investigated. While the tunnel excavation was continuing, cracks occurred in the slope of the exit portal section and at the same time, failure occurred in the tunnel body. In the purpose of this study, both numerical analyzes and new support systems are evaluated to safely re-excavated the failed section, and the analysis of the necessary slope stability and the performance of the results are discussed. In addition, in this study, the interaction of tunnel portal excavation and tunnel support systems in general is investigated and a procedure for such tunnel studies is proposed.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: cgokce@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-4762-9933>

\*\* e.aygar@fugro.com • <https://orcid.org/0000-0002-5738-4602>

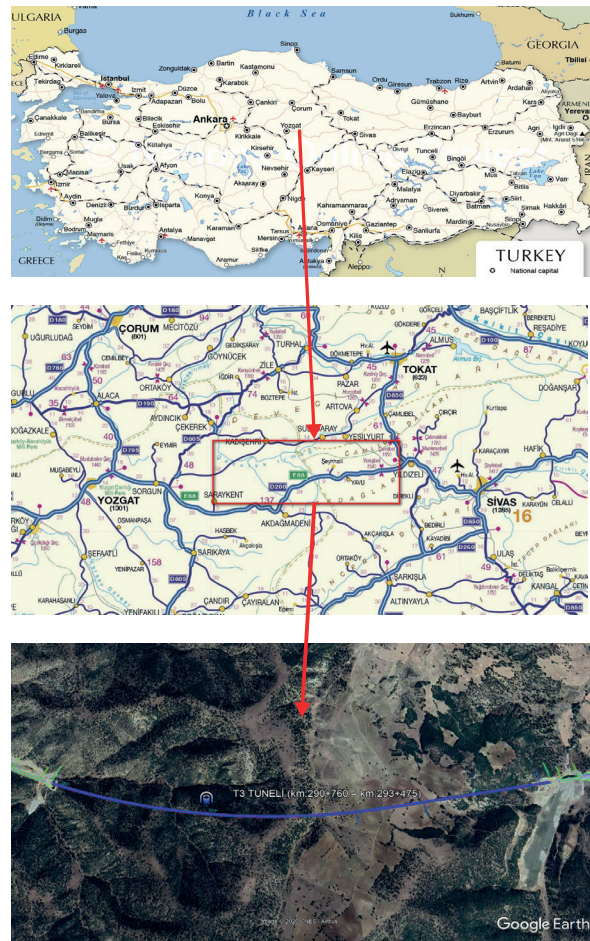
## GİRİŞ

Yüksek hızlı tren yollarındaki geometrik sınırlamalar sebebiyle ideal güzergah seçimi çoğu zaman mümkün olmamakta ve buna ek olarak jeolojik ortamdaki belirsizliklerin artmasıyla tünelcilik çalışmaları oldukça güçleşmekte ve yenilmelerle karşılaşılabilir. Tünelcilik açısından en önemli güçlüklerden biri ise portal ve tünel etkileşimi sonucu ortaya çıkan yenilmelerdir. Çünkü portalde oluşabilecek bir yenilme veya aşırı deformasyon tünel destek sistemlerini de ciddi biçimde etkileme potansiyeline sahiptir. Daha açık bir ifade ile, portal bölgesinde oluşacak bir yenilme tünel içindeki tüm çalışmaların durmasıyla sonuçlanabilecektir. Bu nedenle portal bölgesinde kazı ve destekleme tünelcilik açısından her zaman hayati öneme sahiptir. Nitekim, Khan vd. (2019) yaptıkları çalışmada, portal kesimindeki tünel kazı kademelerini modellemişler ve çalışmalarında bu bölgenin en az deformasyonla geçilmesini önermişlerdir. Ayoublou vd. (2019) ise, portal kesiminde jeoteknik ölçümlerin ve yer değiştirmelerin takibinin önemini vurgulamışlardır. Aygar ve Gokceoglu (2020) Bursa Yenişehir Hızlı Tren Projesi kapsamında T3 tüneline portal kesiminde yaşanan göçük ile bunun tünele olan etkisini nümerik analizlerle inceleyerek, portal duraylılığının önemini ve tünelle olan ilişkisini tanımlamışlardır. Taromi vd. (2018), 10 km uzunluğundaki Sabzkuh su iletim tüneline giriş portalinde konvansiyonel metotla 35 m tünel kazısı sonrasında jeolojik koşullar ve uygun olmayan kazı yöntemi sebebi ile oluşan yenilmeyi inceleyerek, çözüm önerilerini tartışmıştır. Komu vd. (2020) bir tüneline çıkış portaline yakın kesimdeki heyelanlı bölge ile tünel ilişkisini 3 boyutlu nümerik analizlerle incelemiş ve heyelanlı kesimde tünel içi deformasyonların oldukça yükseldiğini saptamışlardır. Bununla birlikte bazı araştırmacılar (Geniş, 2010; Kaya vd., 2016; Rao ve Singh, 2017; Kaya vd., 2017; Tuncay, 2018) tünel portal duraylılığı konusunda çeşitli araştırmalar yaparak, tünel portal duraylılığının, tünelcilik açısından önemini vurgulamışlardır. Ancak portal ile tünel içinde aynı anda gelişen yenilmenin mekanizmasına ilişkin yaygın araştırmalar bulunmamaktadır. Buna karşın, tünelcilik açısından son yıllarda hem portal duraylılığı ve buna bağlı olarak tünel destek sistemlerinin etkileşiminin mekanizmasının anlaşılmasının önemi gittikçe

artmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, inşaatı devam eden Ankara-Sivas yüksek hızlı tren projesi kapsamında tamamlanmış olan T3 tüneline portal bölgesinde başlayan ve buna bağlı olarak tünel içerisinde yaşanan sorunlar incelenmekte, çözüm önerileri nümerik analizlerle değerlendirilmekte ve elde edilen bulgular tartışılmaktadır. Çözüm amaçlı yapılan tüm tasarımlar nümerik analizlerle desteklenmekte olup, analizlerden elde edilen sonuçların performansı da ayrıca sunulmaktadır. Neticede, tünelcilik açısından önemli bir sorun olan portal duraysızlığının tünel üzerindeki etkilerinin bu çalışmanın ana temasını oluşturmaktadır.

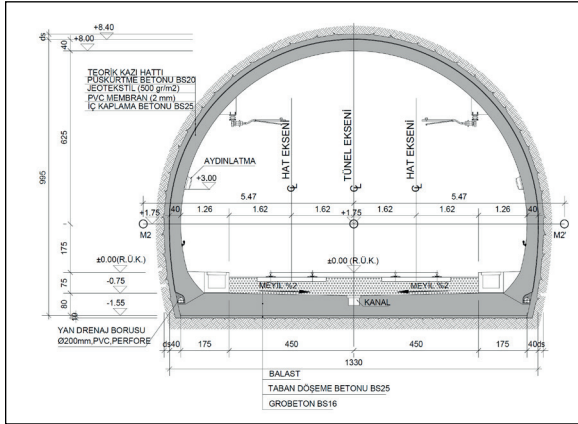
## 1. TÜNEL ÖZELLİKLERİ

Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından Ankara-Sivas Hızlı Tren Demiryolu Projesi kapsamında inşaatı tamamlanmış olan T3 tüneline toplam uzunluğu 2715 m olup, Şekil 1'de konumu verilmektedir.



Şekil 1. Proje alanı yerbulduru haritası

T3 Tünelinin toplam genişliği 12,45 m ve yüksekliği ise 8 m olarak projelendirilmiştir (Şekil 2). Tünel kazı işlemi üst yarı, alt yarı ve taban (invert) kademeleri şeklinde yapılmış olup, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine (NATM) (Rabcewicz, 1964a, b ve 1965) göre projelendirilmiş ve destek tipleri tanımlanmıştır.



Şekil 2. Tünel tip kesiti

## 2. PORTAL VE TÜNELDE MEYDANA GELEN SORUNLAR

İlk olarak tünel kazısı esnasında Km: 293+375-293+400 arasında tünel tavan kesiminden itibaren blok kayması şeklinde yenilme meydana gelmiş ve tünel aynası tamamen kapanmıştır (Şekil 3). Bununla birlikte, tünelin bu kesimi oldukça sığ olduğu için yenilme yüzeyde çöküntü de oluşturmuştur. Kazı aynasından başlayıp, tavadan devam eden yenilmeler sığ tünellerde yer yüzeyine kadar kolaylıkla ulaşabilmektedir (Yang ve Huang, 2011).



Şekil 3. Tünel içinde meydana gelen yenilmenin görünümü

Aynı dönem içerisinde, tüneldeki deformasyonların aşırı artmış ve portal şevlerinde çatlaklar ve püskürtme betonda yenilmelerin olduğu gözlenmiş olup, portal duraylılığını kaybetmeye başlamıştır (Şekil 4).

Şekil 5'de ise portal şevlerinde oluşan çatlakların plan üzerindeki dağılımı görülmektedir. Buna göre çatlakların ağırlıklı olarak portal alın şevi ile sol yan şevlerde geliştiği anlaşılmaktadır. Bu durum portaldeki yenilme ile tünel içindeki yenilmenin etkileşim içinde olduğunu açık biçimde ortaya koymaktadır.

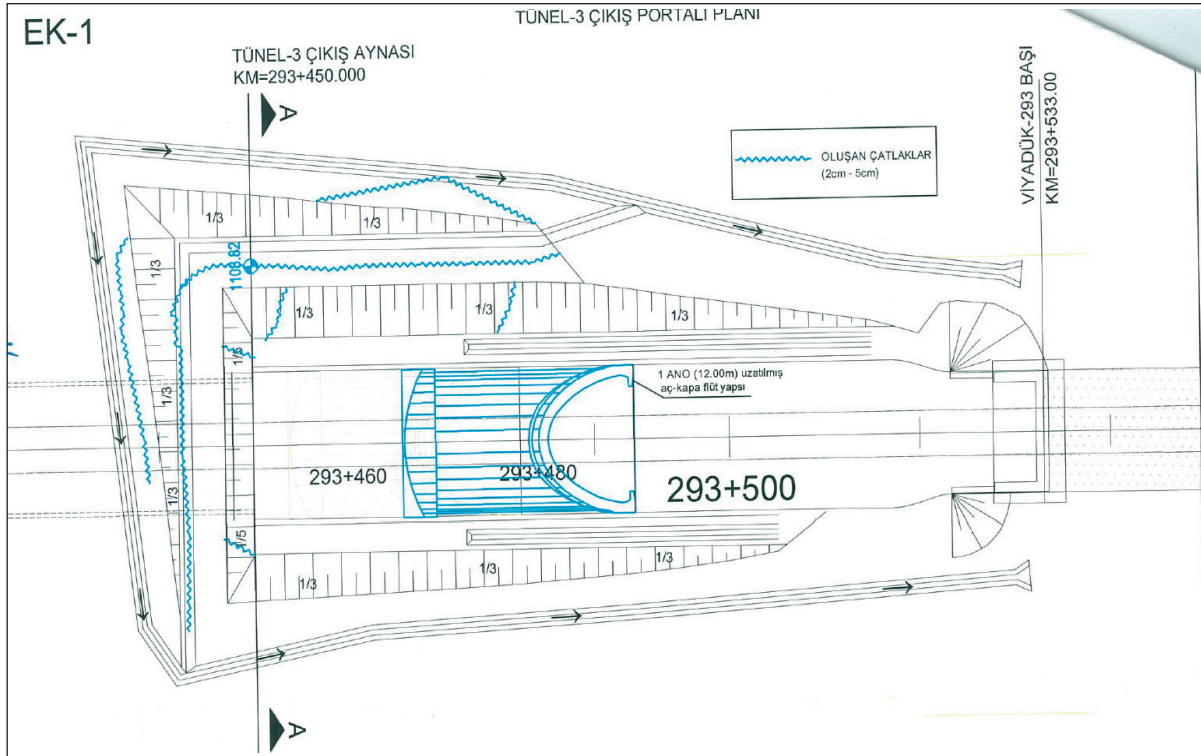


Şekil 4. T3 çıkış portalinde püskürtme betonda meydana gelen çatlaklara bazı örnekler

## 3. PORTAL ŞEVLERİNİN STABİLİTESİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tünel kazı çalışmalarının güvenli biçimde sürdürülebilmesi için öncelikle portal şevleri ile göçük bölgesinde duraylılığın sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle portal şevlerinin duraylılığı değerlendirilmiştir. Tünelde portal alın şevi 1 Yatay:5 Düşey olarak yaklaşık 80 C°, yan şevler ise 1 Yatay:3 Düşey olarak yaklaşık 72 C° olarak projelendirilmiştir. Portal kazısı tamamen bozunmuş andezit içerisinde yapılmıştır. Yapılan bu projelendirmede, alın şevinde 9 m uzunluğunda 2x2 m paterninde yan şevlerde ise yine 2x2 m paterninde 6 m uzunluğunda bulonlar ile destekleme yapılmıştır. Ayrıca şev kazı yüzeylerine 15 cm püskürtme beton ile 2 kat Q221/221 tipinde hasır çelik uygulanmıştır. Belirlenen bu destek sistemleri ile portal şevlerinin kazısı tamamlanmış ve tünel kazısına devam edilmiştir.



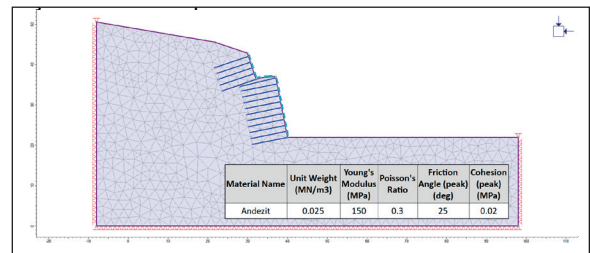


Şekil 5. T3 tüneli çıkış portalinde meydana gelen çatlakların plan üzerinde görünümü

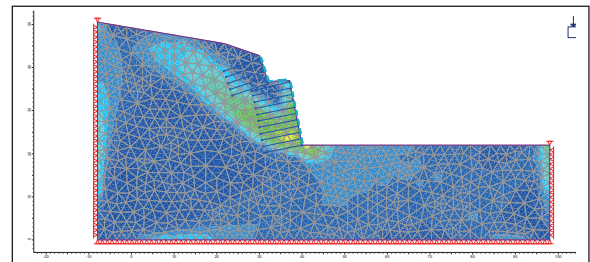
T3 tüneli çıkış portalinde meydana gelen çatlaklar (Şekil 4) güvenlik katsayısının  $FS=1$  olduğu durumu, diğer bir ifade ile tam denge şartını yansıtmaktadır. Güvenlik katsayısının 1,0 olduğu durumu için şevli oluşturan malzemenin parametreleri geriye dönük analizlerle belirlenmiştir. Eklemlili kaya kütleleri için önerilmiş geriye dönük analiz yöntemi (Sönmez vd., 1998) mevcut olmasına rağmen doğrudan bu çalışmada kullanılmamıştır. Çünkü şevli oluşturan tamamen bozunmuş andezitlerin doğrudan kaya kütlesi veya tamamen zemin gibi davranmayacağı, bu ikisinin arasında kalan bir malzeme olarak davranacağı açıktır. Bu nedenle şevli oluşturan malzemenin karakterizasyonu için en uygun yöntem olarak geriye dönük analiz yöntemi tercih edilmiştir. Geriye dönük analizler Phase2D v8.0 (RocScience, 2020) programı kullanılarak yapılmış ve tam yenilme anındaki parametreler tespit edilmiştir. Analizler SRF (Strength Reduction Factor) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde şevli oluşturan malzemenin makaslama dayanım parametreleri azaltılarak güvenlik katsayısı elde edilmektedir (Hammah vd., 2005). Phase2D programı makaslama dayanım azaltma (SSR, shear strength reduction) yöntemi ile güvenlik katsayısını hesaplamaktadır. Bu prensipler dikkate alınarak,

analizlerde kullanılmak üzere Şekil 6'da verilen model hazırlanmıştır.

Yenilme anındaki, diğer bir ifade ile SRF değerinin 1 olduğu koşula karşılık gelen kohezyon, içsel sürtünme açısı ve deformasyon modülü parametreleri tespit edilmiştir. Buna göre,  $c=20kPa$ ,  $\phi=25^\circ$  ve  $E=150 MPa$  olarak hesaplanmıştır (Şekil 7).

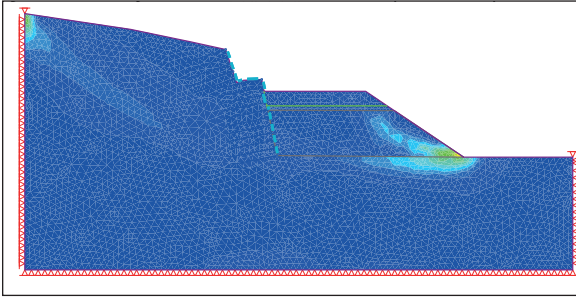


Şekil 6. Phase2D programı ile oluşturulan model



Şekil 7. Geriye dönük analiz sonucu (SRF= 1,0)

Geriye dönük analizlerle tayin edilen parametreler kullanılarak şevlerin uzun dönemde duraylılığını koruması için uygun tahkimat sistemi analizlerle tespit edilmiştir. Buna göre, öncelikle sol şev önüne kaya malzemesi ile ağırlık desteği yapılmasına karar verilmiştir. Devamında ise 12 m uzunluğunda kaya bulonları yerleştirilerek kısa dönem şev duraylılığı sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra portalin uzun dönem duraylılığını sağlamak için şevin olduğu kesime aç-kapa yapısı yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Dolayısıyla mevcut tasarım bu şekilde güncellenmiş ve aç-kapa yapısının üzeri 3 m dolgu ile doldurulması durumunda ise şevlerin güvenlik katsayısı 1,9 olarak elde edilmiştir (Şekil 8). Neticede önerilen bu önlemler ile portal şevlerinin uzun süreli güvenlik şartları ancak sağlanabilmiştir.



Şekil 8. Uzun dönemde aç-kapa yapısının inşaa edildiği ve gerekli güvenlik şartlarının sağlandığı durum (SRF=1,9).

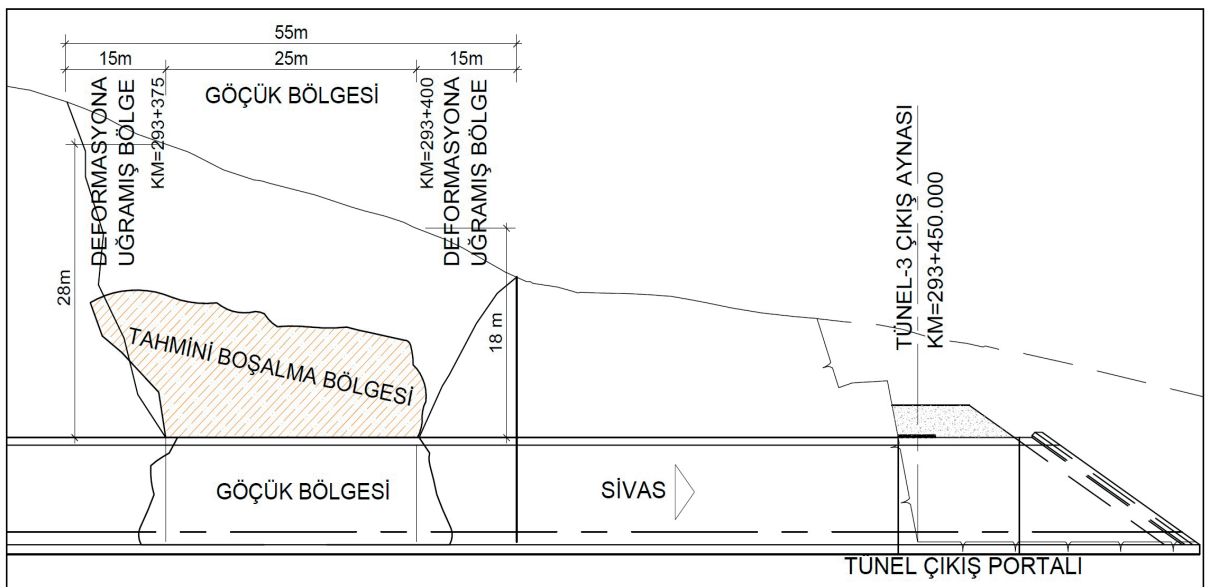
#### 4. TÜNEL İÇİNDE YENİLMİŞ KESİMİN DEĞERLENDİRİLMESİ

T3 tüneline kazı ve destekleme çalışmaları devam ederken tünel aynasında meydana gelen yenilmeye ait fotoğraf Şekil 3'de, kesit ise Şekil 9'da verilmektedir. Meydana gelen yenilme, bir malzeme akışı şeklinde olmayıp, ayrılmış andezit biriminin süresizler boyunca hareket ederek, tahkimatların dayanımını aşması ve tünel içerisinde blok düşmesi şeklinde olmuştur. Devamında kopan parçalar birbiri ardına süresizliklerden ayrılarak tünel aynasını tamamen kapatmıştır. Tahmini tünel içi yenilme bölgesi kesiti Şekil 9'da görülmektedir. Buna göre yenilmiş kesim yaklaşık 25 m'lik bir alanı kapsamakta olup, örtü yüksekliği 18 m ile 28 m arasında değişmektedir (Fugro Sial, 2015).

Yapılan değerlendirmeler dikkate alındığında, meydana gelen göçüğün güvenle geçilmesi için ilk etapta yüzeyden ve tünel aynasından enjeksiyon ile gevşemiş malzemenin iyileştirilmesi gerekmektedir, devamında ise kendinden delmeli boru sürenler ile tünel kazısı yapılmıştır.

Buna göre göçük kesimi için tünel kazı ve destekleme aşamaları dört ana aşamadan oluşmaktadır:

Yüzeyden enjeksiyon ile gevşemiş malzeme sağlamlaştırılmıştır. Yüzeyden enjeksiyon için 5x5 m patern seçilerek (Şekil 10), 1/1 su/çimento oranı

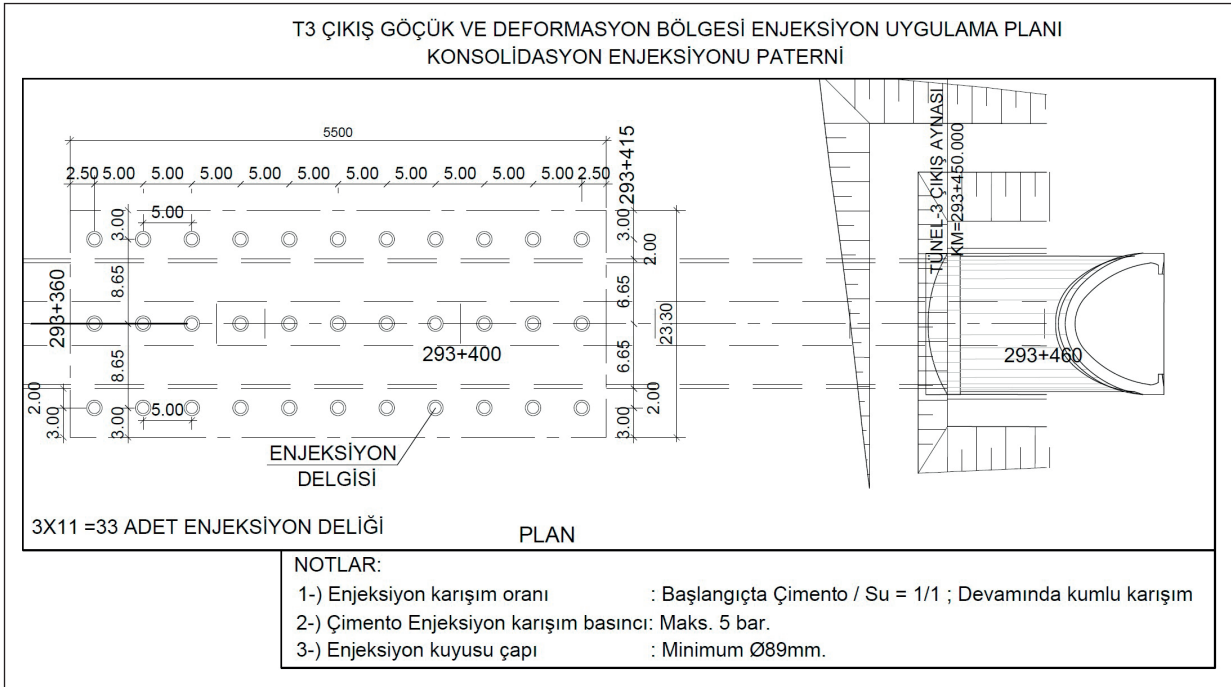


Şekil 9. Tünel içinde meydana gelen yenilmenin kesiti (Fugro Sial, 2015)

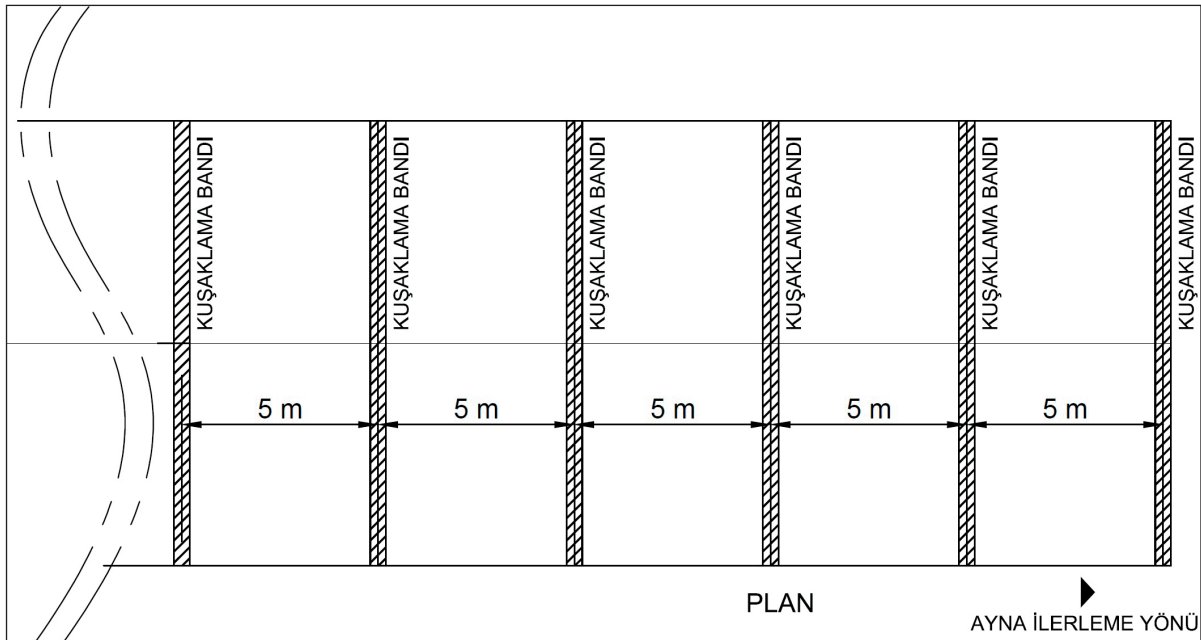
ile enjeksiyona başlanmış sonrasında ise 5/7 su/çimento oranı ile kumlu karışım yapılarak enjeksiyon tamamlanmıştır.

Yenilme sonucunda kesit içerisine giren kesimler için çelik iksa ve püskürtme beton ile ek destekleme yapılmış ve kaya bulonları ile sağlamlaştırılmıştır.

Tünelde meydana gelen ciddi deformasyonlar ve tahkimat sistemlerin-deki yenilmelerden dolayı, tünelin belirli kesimleri de kesit içerisine girmiştir. Yenilme bölgesinin kazısından önce bu kesimlerin, öncelikle duraylılığının sağlanması için 5 m'de bir ek desteklerin yapılması ve kesit boyunca kaya bulonları ile güçlendirilmesi yapılmış ve tünel duraylılığı sağlanmıştır (Şekil 11 ve 12).



Şekil 10. Yüzeyden uygulanan enjeksiyon planı



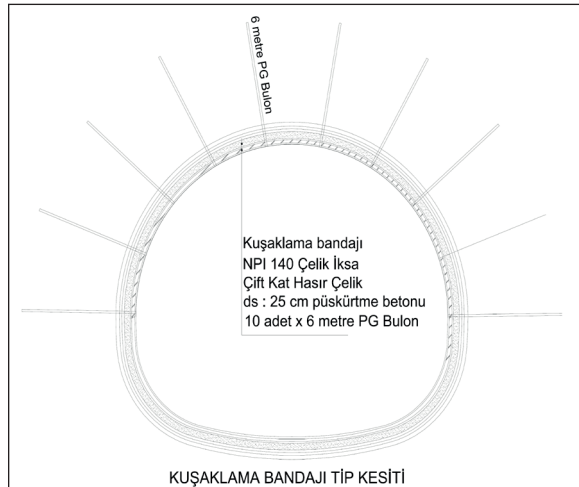
Şekil 11. Tünel ek destekleme uygulama planı



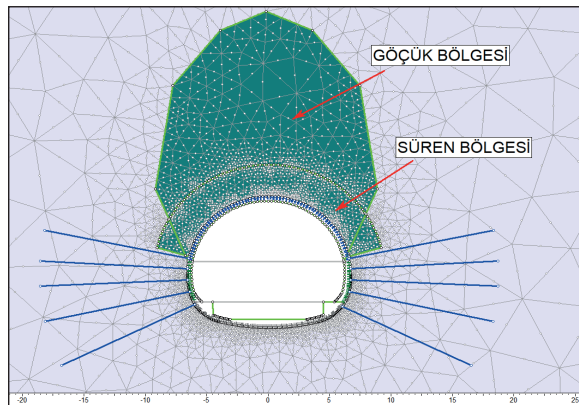
Tünel aynasından göçük bölgesine enjeksiyon yapılarak tünel ayna önündeki malzeme tamamen sağlamlaştırılmıştır. Son aşamada ise sağlamlaştırılan bölgenin kendinden delmeli boru sürenler kullanılarak tünel kazısına devam edilmiştir. Bu aşamada yenilme bölgesinin destek sistemlerinin belirlenmesi için Phase2D programı ile sayısal analizler yapılmıştır (RocScience, 2020).

#### 4.1. Modelleme Aşamaları ve Destek Sistemi

Sayısal analizler öngörülen tahkimat sisteminin incelenmesinde kullanılan en temel yöntemdir ve araştırmacılar (Koçkar ve Akgün, 2003; Akgün vd., 2014; Zou vd., 2019; Moussai vd., 2019) tünellerin tasarımında sayısal analizleri yaygın biçimde kullanmaktadır. Bu çalışmada da sayısal analizlerde kullanılmak üzere oluşturulan model, malzeme parametreleri ve sınır koşulları Şekil 13-15'de verilmektedir. Sayısal modelleme ise 10 aşamada gerçekleştirilmiştir (Çizelge 1).



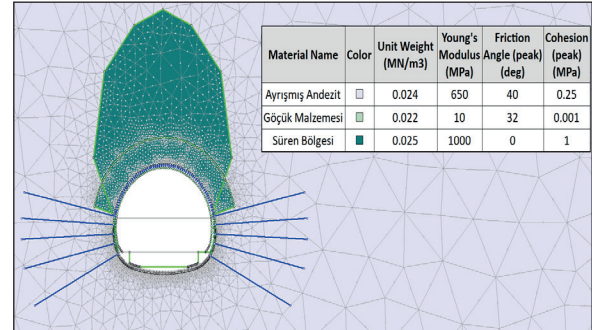
Şekil 12. Tünel ek destekleme uygulama kesiti



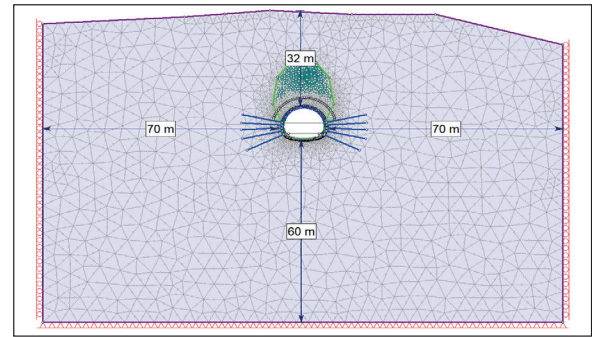
Şekil 13. Yenilme zonunun gösterildiği model

#### 4.2. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yenilmiş kesimin güvenle geçilmesi için öngörülen destek sistemleri kullanılarak yapılan analizlerde, tünel tavanında 2,1 cm, tünel sol ve sağ omuzlarında 1,65 cm, tünel alt yarılarında 1,05 cm ve tünel tabanında ise 1,50 cm yer değiştirme hesaplanmıştır. Tünel çevresindeki dayanım faktörleri ise, 1'in üzerinde olup, tünelden uzaklaştıkça yükselmektedir (Şekil 16 ve 17).



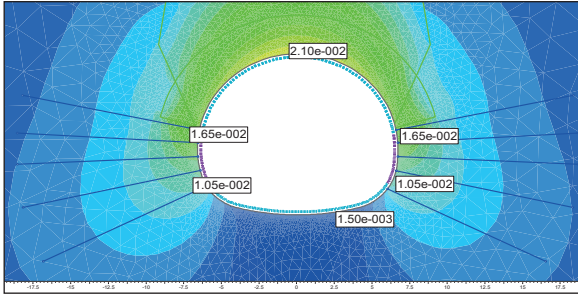
Şekil 14. Modelde kullanılan malzeme parametreleri



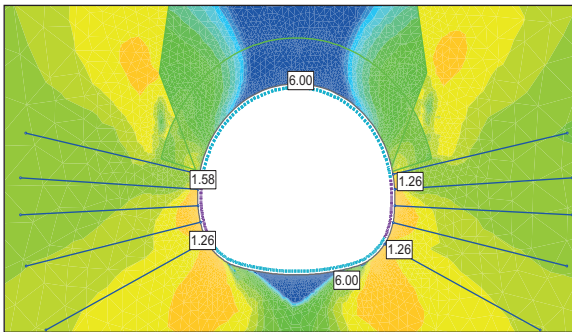
Şekil 15. Phase programı ile oluşturulan modele ait sınır koşulları

Çizelge 1. Modelleme aşamaları

Kademe	Modelleme aşamaları
1	İlk Gerilme
2	Yenilmiş malzemesinin tanımlaması
3	Tünel enjeksiyonu yapılması
4	Sürenlerin çakılması
5	Üst yarı kazısı Püskürtme beton ve kaya bulunu
6	Alt yarı kazısı Püskürtme beton ve kaya bulunu
7	Invert kazısı püskürtme beton ve kaya bulunu
8	Taban betonunun modele girilmesi
9	İç kaplamanın modele girilmesi
10	Deprem ivmesinin modele girilmesi

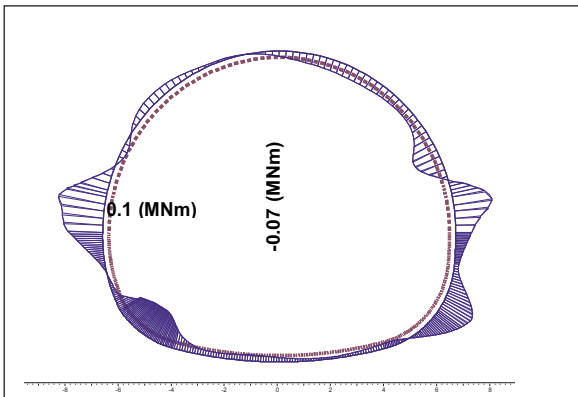


Şekil 16. Tünel çevresinde meydana gelen toplam yer değiştirmeler

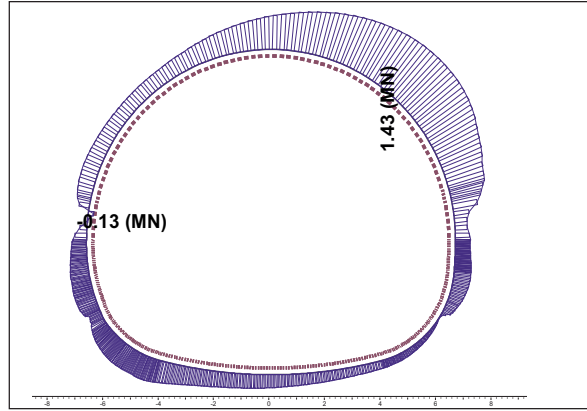


Şekil 17. Tünel çevresindeki dayanım faktörü

Depremler sırasında tünellerin çeşitli derecelerde hasara uğradığı bilinmektedir (Li, 2012; Roy ve Sarkar, 2017). Dolayısıyla, iç kaplama betonunun deprem performansının değerlendirilmesi amacıyla ek analizler gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada gerçekleştirilen analiz sonuçları olarak uzun dönemde iç kaplama betonunda deprem anında oluşan kesit tesirleri Çizelge 2 ile Şekil 18 ve 19'da sunulmaktadır. Bu aşamada gerçekleştirilen analizlerde kullanılan modelden püskürtme beton, bulon, çelik iksa kaldırılmış olup, sadece iç kaplama tanımlanmıştır.



Şekil 18. Kaplamada meydana gelen momentler



Şekil 19. Kaplamada meydana gelen aksel kuvvetler

Kesit tahkiki analizlerinde ise beton sınıfı C25/30 ve ST420 tipi donatı seçilmiştir. Yapılan analizlerde iç kaplama betonu kalınlığı 40 cm olarak demir donatılar 16 mm çapında tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarında iç kaplama betonuna gelen moment ve aksel kuvvetler incelenmiş ve kesitin yeterli geldiği görülmüştür (Şekil 20).

Çizelge 2. Uzun dönemde kaplamaya gelen moment ve aksel kuvvet değerleri

	Eksel kuvvet (MN)	Moment (MNm)
Kesit tesirleri	-1.430	0.100

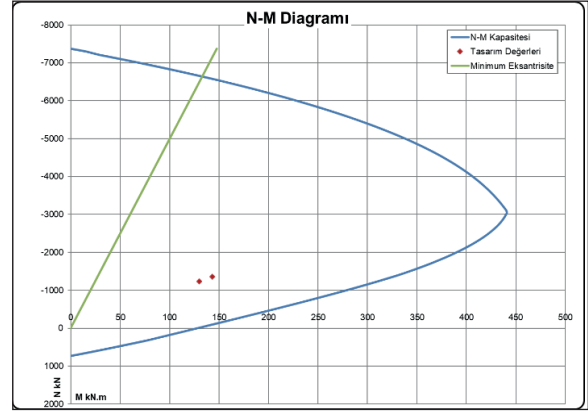
#### 4.3. Yenilme Bölgesi Destek Sistemleri

Enjeksiyon işleminin tamamlanmasından ve deformasyon bölgelerindeki ek destekleme sistemlerinin tamamlanmasını takiben üst yarı kazısına başlanmıştır. İlk aşamada tünel üst yarısı boyunca 30 cm ara ile 3,5" çapında, 9 m uzunluğundaki birinci kat kendinden delmeli boru sürenler yaklaşık 8 derece açı ile yerleştirilmiştir. Birinci kat sürenlerin hemen üzerinden ikinci kat sürenler 50 cm ara ve 15 derece açı ile yerleştirilmiştir (Şekil 21 ve 22). Sürenlerin son 6 m'si delikli olup, 4,5 m bindirmeli olarak uygulaması yapılmıştır.

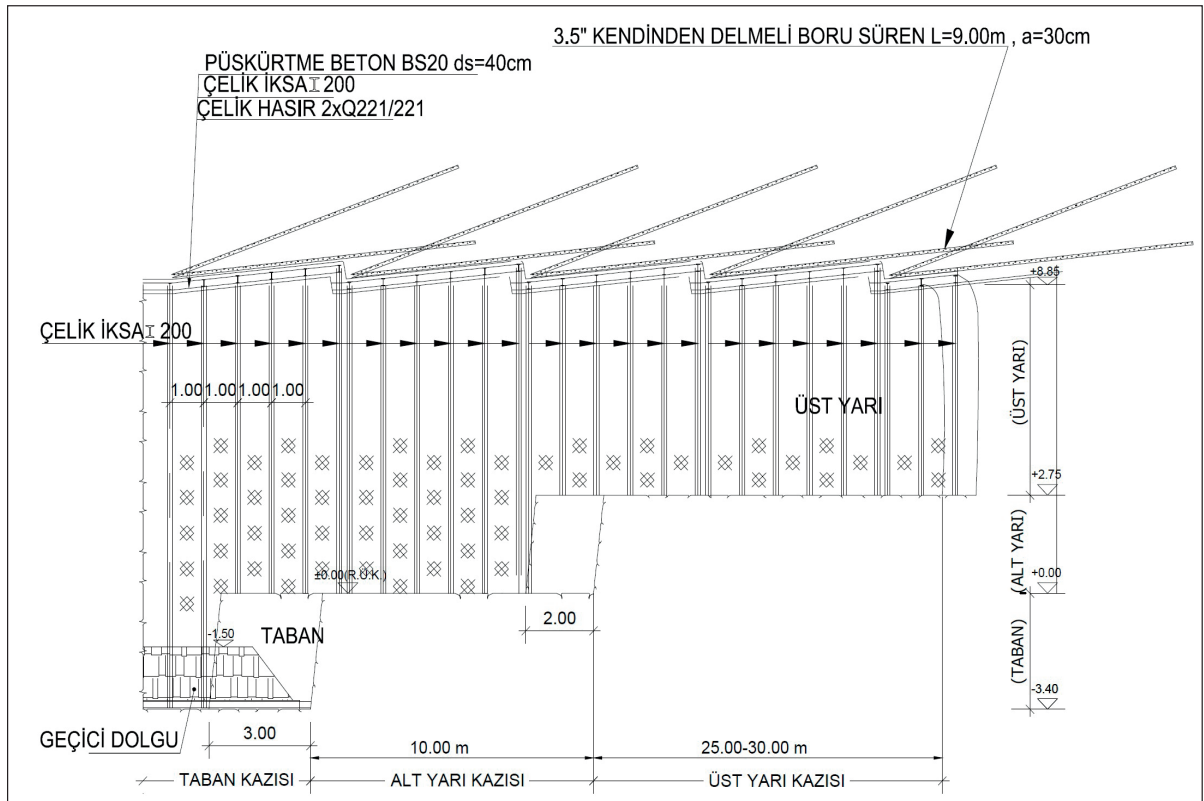
Göçük bölgesi için uygulanan destek sistemi ayrıntıları aşağıda özetlenmiştir.

- Tünel kazısı (ilerleme boyu 0,75 m),
- Yüzeyin ve aynanın 10 cm püskürtme beton ile kaplanması,

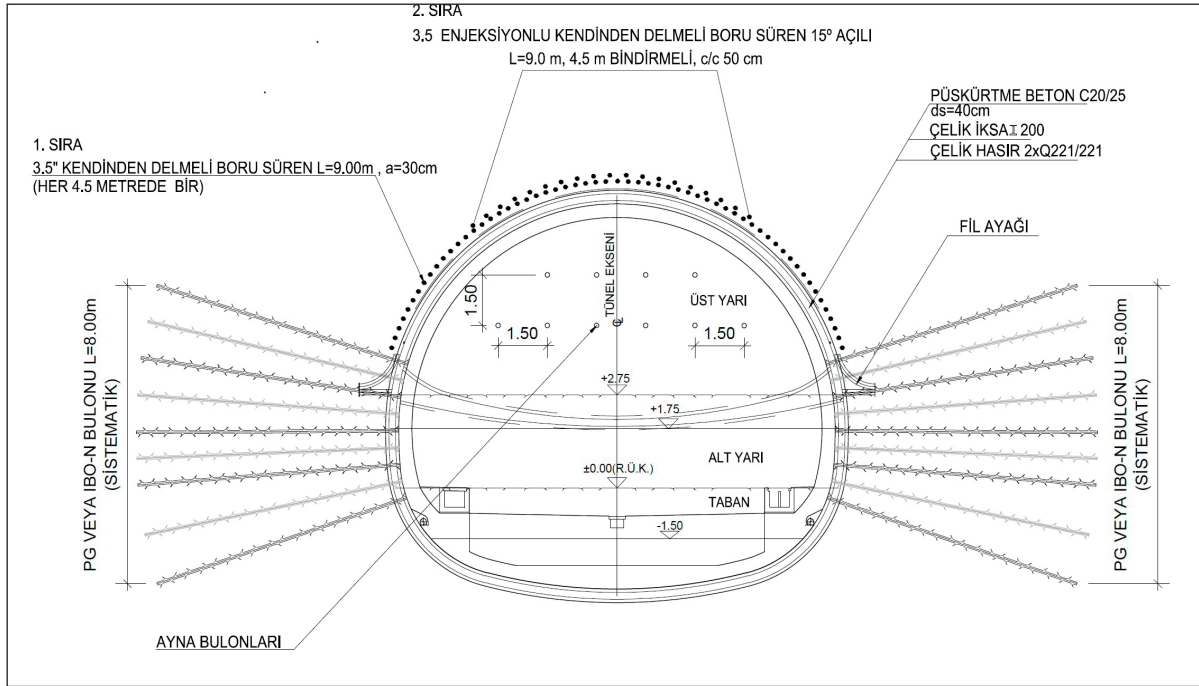
- c) 1 kat hasır çelik (Q221/221) ile I-200 çelik iksa-  
nın yerleştirilmesi,  
d) Püskürtme betonun 30 cm'ye tamamlanması  
(C 20/25),  
e) İkinci kat Q221/221 tipi hasır çelik yerleş-til-  
mesi,  
f) Püskürtme betonun 40 cm'ye tamamlanması  
(C20/25),  
g) Kaya bulonlarının yerleştirilmesi ve enjeksiyon-  
ların yapılmasıdır.



Şekil 20. Eksenel kuvvet-moment etkileşim diyagramı



Şekil 21. Tünel yenilme bölgesi destekleme sistemi detayları



Şekil 22. Tünel yenilme bölgesi destekleme sistemi kesiti

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Hızlı tren demiryolları ve otoyollar için gereken yüksek teknik standartlar ve geometrik sınırlamalar, sık tünellerin inşasını zorunlu olarak arttırmaktadır (Zhang vd., 2019). Bununla birlikte tünelcilik açısından en kritik kesimler portal bölgeleridir. Kazılar sırasında portal şevlerinde oluşabilecek aşırı deformasyonlar tünel içerisinde de etkili olacak ve tünelin göçmesine sebep olabilecektir. Bu nedenle duraylılık açısından tünel içi ile portal bölgesi kesinlikle ayrı düşünülmemeli ve mutlaka bu etkileşim dikkate alınarak birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, kazılar sırasında tünel ve portal yenilmesinin bir arada olduğu bir tünel olan ve Ankara – Sivas hızlı tren projesi kapsamında inşa edilen T3 tüneli bu çalışma kapsamında araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda elde edilen sonuçlar ve tartışmalar aşağıda sunulmaktadır:

T3 tüneline portal ve tünel içi yenilmesi eş zamanda oluşmuş ve bu yenilmeler birbirini tetiklemiştir. Tünel güvenliğinin sağlanabilmesi için öncelikle portal duraylılığının sağlanması gerekmektedir. Tamamen bozunmuş andezitlerden, dolayısıyla oldukça zayıf bir malzeme

çinde açılan portal şevleri ek desteklemelere rağmen duraylılığını kaybetmiş ve bu kesimde oluşan aşırı deformasyonlar tünelin 25 m'lik bir kesiminde göçüğe neden olmuştur. Yapılan araştırmada ek desteklemelere rağmen portal şevlerinin uzun dönemde duraylılığını koruyamayacağı sonucuna ulaşıldığı için bu bölgeye aç-kapa yapısı önerilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, portal şevlerinin duraylılığı ancak aç-kapa yapısı ve üstüne 3 m'lik dolgu ile sağlanabilmiştir. Devamında, tünel içinde yenilmiş kısmın yeniden kazılabilmesi için yüzeyden enjeksiyon prosedürü uygulanarak gevşemiş kesimin iyileştirilmesi gerekmiştir.

Tüm tahkimat ve kazı aşamaları sayısal analizlerle araştırılmış ve öngörülen tahkimat sisteminin başarı ile uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Önerilen kazı aşamaları ve tahkimat sistemleri kullanılarak tünel inşaatı başarı ile tamamlanmıştır. Ayrıca, tünelin yeniden kazılması aşamasında önerilen tasarım, yerindeki gözlem ve ölçümlerle kontrol edilmiş ve analiz sonuçlarının başarılı bir performans gösterdiği sonucuna varılmıştır. Analizler ile uygulama sonuçlarının uyumundaki en kritik husus, saha karakterizasyonunun doğru



yapılmasıdır. Diğer bir ifade ile, yenilmiş şevlerin geriye dönük analizlerinden elde edilen parametrelerin doğal malzemeyi yeterince temsil etmesi ve ayrıca göçük mekanizması ile yayılma alanının doğru tespit edilmesi, analizlerden beklenen performans için temel kriterlerdir. Analizlerle kontrol edilen tasarımın bu çalışma kapsamında başarı ile uygulanması yukarıda verilen kriterlerin yeterince sağlandığını göstermektedir. Neticede bu çalışmada portal ve tünel yenilmesinin bir arada olduğu durumlar için bir araştırma ve uygulama prosedürü önerilmiştir. Önerilen prosedürün performansı uygulama boyunca izlenmiş ve başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gelecekte yapılacak tünel çalışmalarında portalin zayıf zeminler içinde oluşturulması halinde, portal duraylılığının sağlanması için yeterli uzunlukta aç-kapa yapılarının öncelikle düşünülmesi ve planlanması tünel duraylılığı açısından hayati öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmadaki desteklerinden dolayı TCDD Genel Müdürlüğü ve Fugro Sial'e teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

Akgün, H., Muratlı, SW., Koçkar, M.K., 2014. Geotechnical Investigations and Preliminary Support Design for the Geçilmez Tunnel: A Case Study Along the Black Sea Coastal Highway, Giresun, Northern Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 277 – 299.

Aygar, E.B and Gokceoglu, C., 2020. Problems Encountered During a Railway Tunnel Excavation in Squeezing and Swelling Materials and Possible Engineering Measures: A Case Study from Turkey. *Sustainability*, 12, 1166.

Ayoublou, F., Taromi, M., Eftekhari, A., 2019. Tunnel Portal Instability in Landslide Area and Remedial Solution: A Case Study. *Acta Polytechnica*, 59(5), 435–447.

Fugro Sial Yerbilimleri, 2015. Ankara-Sivas Hızlı Tren Demiryolu Projesi Yerköy-Yozgat-Sivas Arası, T3 Tüneli (Km: 293+375 - 293+400) Arasında Meydana Gelen Göçük Değerlendirme Raporu.

Geniş, M., 2010. Assessment of the Dynamic Stability of the Portals of the Dorukhan Tunnel Using Numerical Analysis. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 47, 1231–1241.

Kaya, A., Akgün, A., Karaman, K., Bulut, F., 2016. Understanding the Mechanism of Slope Failure on a Nearby Highway Tunnel Route by Different Slope Stability Analysis Methods: A Case From NE Turkey. *Bull Eng Geol Environ*, 75, 945–958.

Kaya, A., Karaman, K., Bulut, F., 2017. Geotechnical Investigations and Remediation Design for Failure of Tunnel Portal Section: A Case Study in Northern Turkey. *Journal of Mountain Sciences*, 14 (6), 1140 – 1160.

Khan, R.M.A., Mad, Z., Jo, B., 2019. Tunnel Portal Construction Using Sequential Excavation Method: A Case Study. *Acta Polytechnica*, 59(5), 435–447.

Koçkar, M.K., Akgün, H., 2003. Methodology for Tunnel and Portal Support Design in Mixed Limestone, Schist and Phyllite Conditions: A Case Study in Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, 173 – 196.

Komu, M.P., Guney, U., Kilickaya, T.E., Gokceoglu, C., 2020. Using 3D Numerical Analysis for the Assessment of Tunnel–Landslide Relationship: Bahce–Nurdag Tunnel (South of Turkey). *Geotech Geol Eng*, 38, 1237–1254.

Hammah, R.E., Yacoub, T.E., and Corkum, B.C., 2005. The Shear Strength Reduction Method for the Generalized Hoek-Brown Criterion. *ARMA/USRMS, American Rock Mechanics Association*, 05-810.

Li, T., 2012. Damage to Mountain Tunnels Related to the Wenchuan Earthquake and Some Suggestions for Aseismic Tunnel Construction. *Bull Eng Geol Environ*, 71, 297–308.

Moussaei, N., Sharifzadeh, M., Sahriar, K., Khosravi, M.H., 2019. A New Classification of Failure Mechanisms at Tunnels in Stratified Rock Masses Through Physical and Numerical Modelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 91, 103017.

Rabcewicz, L.v., 1964a. The New Austrian Tunnelling Method, Part One. *Water Power*, pp. 453–457.

Rabcewicz, L.v., 1964b. The New Austrian Tunnelling Method, Part Two. *Water Power*, pp. 511–515.

- Rabcewicz, L.v., 1965. The New Austrian Tunnelling Method, Part Three. Water Power, pp. 19–24.
- Rao, K., Singh, T., 2017. Two-Dimensional Finite Element Based Parametric Analysis of South Portal Slope, Rohtang Tunnel, India. Procedia Engineering, 173, 1330 – 1333.
- RocScience, 2020. Phase2 8.0 Excavation & Support Design. <https://rocscience.com/documents/pdfs/uploads/8706.pdf>.
- Roy, N., Sarkar, R., 2017. A Review of Seismic Damage of Mountain Tunnels and Probable Failure Mechanisms. Geotech Geol Eng, 35, 1–28.
- Sönmez, H., Ulusay, R., Gokceoglu, C., 1998. A Practical Procedure for the Back Analysis of Slope Failures in Closely Jointed Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 35 (2), 219 – 233.
- Taromi M., Eftekhari A., Hamidi J. K., Eghbali A., 2018. Tunnel Designing and Construction Process in Difficult Ground Conditions Using Controlled Deformations (ADECO) Approach: A Case Study. International Journal of Mining and Geo-Engineering, IJMGE 52-2, 149–160.
- Tuncay, E., 2018. Assessments on Slope Instabilities Triggered by Engineering Excavations Near a Small Settlement (Turkey). Journal of Mountain Sciences, 15 (1), 114-129.
- Yang, X.L., Huang, F., 2011. Collapse Mechanism of Shallow Tunnel Based on Nonlinear Hoek–Brown Failure Criterion. Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 686 – 691.
- Zhang, Z., Li, H., Yang, H., Wang, B., 2019. Failure Modes and Face Instability of Shallow Tunnels Under Soft Grounds. International Journal of Damage Mechanics, 28 (4), 566–589.
- Zou, J., Chen, G., Qian, Z., 2019. Tunnel Face Stability in Cohesion-Frictional Soils Considering the Soil Arching Effect by Improved Failure Models. Computers and Geotechnics, 106, 1-17.



Orijinal Araştırma / Original Research

## HAMMADDE VE KLİNKER ÖĞÜTÜLEBİLİRLİKLERİNİN ÇİMENTO ÜRETİMİNDE ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RAW MATERIAL AND CLINKER GRINDABILITY ON ENERGY CONSUMPTION IN CEMENT PRODUCTION

Abdul Vahap Korkmaz<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Dinar/Afyonkarahisar, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 08 Mayıs / May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 01 Temmuz / July 2020

### Anahtar Sözcükler:

Klinker,  
Çimento,  
Ham Madde,  
Öğütme,  
Enerji.

### ÖZ

Bu çalışmada kalker, mermer artığı, kil taşı, tras, alçı taşı ve klinker üzerinde Hardgrove ve Bond öğütülebilirlik testleri yürütülmüştür. İki farklı tesise ait klinker örnekleri üzerinde 35 ve 45 dakika öğütme süresi sonunda klinkerlerin incelik değerleri karşılaştırılmıştır. Endüstriyel ölçekte farklı tesislere ait özdeş iki değirmende Cem I 42,5 R ve Cem IV/B 32 R çimentoları öğütülerek 32 µm, 45 µm ve 90 µm elek üstü değerleri karşılaştırılmıştır. Endüstriyel değirmenlerde farklı tip çimento üretimleri için birim enerji tüketimleri hesaplanarak kıyaslanmıştır. Hammaddelerin öğütülebilirlik farkları, çimento üretiminde harcanan enerji miktarları deneysel ve endüstriyel testlerle ortaya konulmuştur. En kolay öğütülen malzemenin kil taşı, en zor ise klinker olduğu görülmüştür. HGI ve Bond testleri sonucunda öğütülmesi kolay malzemeler ile endüstriyel ölçekte çimento üretilmek istenildiğinde, öğütülmesi zor olan klinkere ikame olarak tras, kalker ve mermer artığı kullanılarak üretilen katkı çimentolarının öğütme enerjisi ihtiyaçlarının Cem I Portland çimentosundan daha az olduğu ve daha kolay öğütülebildikleri teyit edilmiştir.

### ABSTRACT

In this study, Hardgrove and Bond grindability tests were carried out on limestone, marble residue, clay stone, trass, gypsum and clinker. Grinding tests were performed on clinker samples belonging to two different facilities, and the fineness values were compared by grinding for 35 and 45 minutes. Cem I 42.5 R and Cem IV/B 32, R cements were ground in two identical mills in different industrial size plants and the fineness values of 32 µm, 45 µm and 90 µm were tested and compared. Unit energy consumption for different types of cement production in industrial mills is calculated and presented in comparison. Differences in the grindability of raw materials and the amount of energy spent in cement production were determined by experimental and industrial tests. The most easily ground material was clay stone, while the most difficult was clinker. As a result of HGI and Bond tests, it was confirmed that when cement is produced on an industrial scale with easy to grind materials, doped cements produced using trass, limestone and marble residues as substitutes for clinker, which is difficult to grind, their grinding energy needs are less than Cem I Portland cement and they can be ground more easily.

### Keywords:

Clinker,  
Cement,  
Raw Material,  
Grinding,  
Energy.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: [avkorkmaz@aku.edu.tr](mailto:avkorkmaz@aku.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0001-8691-1937>



## GİRİŞ

Hammaddeler genellikle belli bir elek üstünde % bakiye olarak tarif edilen inceliklere öğütülürler. Bu incelik kimyasal ve fiziksel analizlerle ortaya çıkacak ve üretilecek çimento tipine özgü testlerle ifade edilmektedir. Çimento ürün standartlarının öngördüğü inceliğe bağlı bir yüzey alanına göre öğütülmektedir (Çolak, 2018).

Çimento sektöründe seçilecek değirmen boyutları döner fırının garanti performansının üstünde bir potansiyel üretim miktarını gerçekleştirecek şekilde tayin edilmektedir. Bir çimento değirmeninin üretim kapasitesi, döner fırının kalite standartları dahilinde ürettiği klinkere ilave edilen alçıtaşı ve cüruf veya puzolan gibi diğer katkı maddelerini de hesaba katmak suretiyle saptanmaktadır. Enerji kaynağının maksimum limitleri de değirmen çalışma ve öğütülebilirlik süresini etkileyeceğinden göz ardı edilmemelidir. Kısaca öğütülecek olan hammaddenin özellikleri ve tipi değirmen sistemi seçimini etkileyen en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır (Hoşten ve Fidan, 2012).

Geçmişten günümüze öğütme teknolojisinde performans artırma çalışmaları öğütme elemanlarının yani bilyaların optimizasyonu üzerinden yürütülmüştür (Benzer, 2005). Bilyaların optimizasyonu için simülasyon ve model geliştirme metotları gerek endüstride gerekse literatür çalışmalarında en çok tercih edilen ve kabul gören yöntemler arasında olmuştur. Fakat hammaddelerin öğütmeye olan etkileri öğütücü elemanların optimizasyon çalışmaları kadar yeterince araştırmaya konu olmamıştır. Öğütme elemanları (bilyalar) kadar öğütülecek hammaddelerin özelliklerinin de öğütme işlemleri ve öğütme verimi için son derece önemli olduğu aşikardır (Venkatanarayanan ve Rangaraju, 2015).

Her hammaddenin mineralojik yapısı, kimyasal ve fiziksel özellikleri ayrı ayrı ve kendine özgü olup, hepsi birbirinden farklı kırılma ve öğütme davranışları göstermektedir. Bu nedenle bir çok endüstriyel tesis farklı ürünler üretmek için aynı minerali fakat farklı jeolojik yapı, mineralojik yapı ve farklı kimyasal içeriklere sahip hammaddeleri kullanmaktadırlar (Smith, 2013). Kaldı ki bir tesise ait kalker ocağının ya da kil ocağının farklı basamaklarında dahi kimyasal ve jeolojik

yapı değişmektedir. Bu nedenle de her mineralin bulunduğu yerde oluşum şekline ve geçirdiği metamorfizma ya da alterasyon neticesinde öğütülebilirlikleri de değişmektedir. Dolayısıyla bir üretim prosesine başlamadan önce o proses için karar verilmiş hammaddeler çok iyi tanımlanmalı ve analiz edilmelidir. Tüm üretim prosesleri sahip olduğu hammaddelere göre tasarlanmaktadır (Speight, 2012).

Klinker de yine bir çimento üretim sonucu üretilen bir üründür. Bazı fabrikalar klinker üretmek için kalker, bazıları mermer atığı, bazı fabrikalar ise marn hatta düşük silisli marn ve yüksek silisli marn olmak üzere bir çok farklı hammadde kullanmaktadırlar (Alp vd., 2009). Bir çok fabrika silis ihtiyacını kil mineralleri vasıtasıyla karşılamaktadır. Bazı fabrikalar kil taşı, bazı fabrikalar ise şist ya da silis kumu ve buna benzer bir çok tesis değişik kil türevli kayaçlar kullanabilmektedir. Bu hammaddelerin değişken özellikleri sonucu öğütülebilirlikleri de farklı olmakta, kolay öğütülebilen kayaçlar enerjiyi düşürürken zor öğütülenler ise enerji maliyetlerini arttırmaktadır (Gouda, 1979). Silikat modülü yüksek bir farin ya da klinkerin öğütülmesi silikat modülü düşük kayaçlara göre daha zor olmaktadır. Bu da doğrudan çimento üretim maliyetlerini etkilemektedir. Çimento endüstrisi, dünya enerjisinin yaklaşık % 3,5'ini kullanan en büyük endüstrilerden biridir. Çimento endüstrilerinde, üretim prosesinde kullanılan elektrik enerjisinin % 40'ı öğütmede harcanmaktadır (Deniz vd., 2001).

Başta çimento üretim prosesleri olmak üzere yapılan optimizasyon çalışmaları değişken sayısının artması nedeniyle çok zaman almakta ve her fabrika için değişen proses şartlarına uyum sağlamamaktadır. Her fabrikanın kendine özgü hammaddeleri de göz önüne alınarak optimizasyon ve modelleme çalışmaları bu şekilde yeniden her üretim prosesini için ayrı ayrı yapılmalıdır. Bu da işveren için pahalı ve zahmetli bir yöntem olmaktadır. Kısaca her hammaddenin özellikle klinker ve çimento gibi spesifik ürünlerin fabrikadan fabrikaya değişmesi nedeniyle bir tesis için optimizasyon ve modelleme çalışmaları diğer bir tesisin prosesine uymamaktadır (Koçkar ve Akgün, 2003; Akgün vd., 2014; Zou vd., 2019; Moussaie vd., 2019)

Bu çalışmada, çimento sektöründe kullanılan gerek kalker, kil gibi ana hammaddelerin gerekse

tras, alçıtaşı gibi yardımcı hammaddelerin Hardgrove ve Bond testleri ile iş indeksleri hesaplanmıştır. Bunlara ilave olarak bir çok çimento endüstrisinde yeni yeni değerlendirilmeye alınmış mermer atıklarının (traverten dahil) ve farklı tesislere ait iki klinker örneğinin de Hardgrove ve Bond iş indeksleri hesaplanmıştır. Daha sonra tüm ana hammaddeler ve yardımcı hammaddelerler kullanılarak endüstriyel çapta öğütülen hammadde karışımlarından Portland ve katkı çimento örneklerinin 35, 45 ve 90 µm incelikte öğütülebilirlikleri karşılaştırılmıştır. Yine farklı iki tesise ait klinker örnekleri 35 ve 45 dakika süresince öğütülerek 90 µm boyutlarında elek analiz testleri yapılmıştır.

## 1. MALZEME VE METOT

Deneysel çalışmalarda, entegre çimento fabrikası ana ve yardımcı hammaddeleri kullanılmıştır. Söz konusu fabrikada Portland çimentosu üretilmekte ve bu çimentonun üretiminde kalker, mermer atıkları, kil taşı, tras ve alçı taşı kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında hammaddeler çeneli kırıcılarda kırılıp hazırlandıktan sonra farklı sürelerde 330x330 mm hacimli laboratuvar tipi bilyalı değirmende öğütülmüş ve öğütülebilirlikleri incelenmiştir. Ayrıca, Hardgrove ve Bond öğütülebilirlik deneyleri yapılmış ve bu testlerden yola çıkılarak iş indeksi değerleri hesaplanmıştır (Bond, 1961; Hardgrove, 1932).

Bond Eşitliği;

$$W=W_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad (1)$$

Wi: Değirmenin çektiği enerji (kWs/t)

P: Kırılmış malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (µm).

F: Kırılacak malın % 80'inin geçtiği elek açıklığı (µm).

W: Bond iş indeksi (kWs/t) Kapalı devre öğütme

Ayrıca farklı iki tesiste üretilen klinker örnekleri 35 dakika ve 45 dakika süresince laboratuvar tipi bilyalı değirmende öğütülerek klinker incelikleri (+90 µm elek üstü) karşılaştırılmıştır.

Yine farklı iki tesise ait endüstriyel boyutta üretilen Cem I 42,5 R ve Cem IV 32,5 R çimento örneklerinden gün bazlı olarak saatlik numuneler alınarak 32,45,90 µm mluk elek analizi değerleri hesap edilerek çimento tiplerine göre incelik değerleri karşılaştırılmıştır.

Çalışma için çimento hammaddeleri olarak kullanılan kalker, kil, tras, alçıtaşı, demir cevheri ve traverten atıkları ve kil kaynaklı kayaçlardan alınan örneklerle XRF metodu kullanılarak kimyasal analizleri tespit edilmiştir. Rutubet ve kızdırma kaybı tayinleri yapılmıştır.

Hammadde ocak kademelerindeki kalite değişimlerini göstermek amaçlı yapılan kalker ve kil hammaddelerinin, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de deneysel çalışmalarda kullanılan hammaddelerin ve klinkerlerin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3 'te verilmiştir. Ayrıca alçıtaşı ile yapılan kimyasal analiz sonucunda alçı taşının %88,44'ü dihidrat alçıdan (2 molekül sulu alçı), %3,07'si anhidrit alçıdan oluşmaktadır. Anhidrit alçı, susuz kalsiyum sülfat (CaSO<sub>4</sub>) anlamına gelmektedir. Hidrat terimi kristal yapısında su olan bileşikler için kullanılır.

Şekil 1'de gösterilen çimento hammaddeleri, öncelikli olarak havada kurutulmuştur. Genellikle çimento fabrikalarında bu hammaddeler termal kurutmaya maruz bırakılmadan havada kurularak tesise beslenmektedir. Dolayısıyla hammaddelerin içerisinde az da olsa bünye nemi bulunmaktadır. Yapılan ön çalışmalarda havada kuru kalkerde %0,5, mermer atığında %0,8, kil taşında %4, trasta %1,5 ve alçı taşında ise %2,5 nem tespit edilmiştir. Hammaddeler öğütme deneylerinden önce sırasıyla çeneli ve merdaneli kırıcılardan geçirilerek tamamı 8 mm'nin altına indirilmiştir. Daha sonra 1 mm'lik elekten elenmiş, elek altı ayrılarak elek üstü ile öğütme deneyleri yapılmıştır. 1 mm'nin altındaki malzemenin değirmene beslenmemesinin nedeni, değirmene her defasında homojen beslemenin yapılmak istenmesidir. Bu yüzden, değirmene beslenen tane boyutu daha dar bir fraksiyon olan -8+1 mm aralığındaki (d<sub>80</sub>~6mm) çimento hammaddeleridir. Boyutu -8+1 mm olan çimento hammaddeleri, laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen (Şekil 2) ile 4, 8, 12, 15 ve 30 dakika öğütme sürelerine tabi tutulmuş ve ardından kuru elek analizi yapılarak elek altı eğrileri çizilmiştir. Çimento hammaddelerinin öğütülmesindeki amaç,

çimento üretimi için gerekli olan tane boyutunun (en az %80'inin 75 µm'un altında olması istenir) elde edilmesidir.



Şekil 1. Çimento hammadde örnekleri



Şekil 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen

## 2. BULGULAR

### 2.1. Çimento Hammaddelerinin Kimyasal Analizleri

Çimento hammaddelerinin kimyasal özellikleri, genellikle ocağın jeolojik özellik ve mineralojik farklılıklarından dolayı hammaddelerin kimyasal analizleri de farklılık göstermektedir. Ocaktan çıkarıldıklarında doğal halleriyle işlenen temel hammaddeler, kimyasal kaliteleri açısından

birtakım değişiklikler göstermekte olup, çimento üretiminde de öğütme ya da pişirme proseslerinin kontrolü için tesislerin bu yönde gelişmesi sağlanmalıdır. Ocak kademelerinde farklı kalitede farklı özelliklere sahip stabil kalitedeki malzeme her kademede bulunmayabilir. Gerek yüksek silisli malzemeyi gerekse düşük silisli malzemeyi değirmene doğrudan beslemek zorunda kalınabilir (Şekil 3). Bu ise değirmenin stabil bir şekilde çalışmasını engeller ve enerji maliyetlerini arttıran bir husus olarak karşımıza çıkar. Bunu önlemek için bazı fabrikalar doğrudan besleme yerine ön homojenizasyon sistemleri kurmaktadır. Fakat her zaman minerallerin homojenizasyon işlemleri istenildiği şekilde gerçekleşmemektedir. Bunun için ocak işletme yöntemleri, gözle yapılan muayene, tecrübeye dayanan bilgiler, karot örneklerinin analizi önem taşımaktadır. Ayrıca analiz sonuçlarının çok iyi okunarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



Şekil 3. Çimento fabrikalarına ait farklı kimyasal yapı ve özelliklere sahip kil ocakları; a) SiO<sub>2</sub> içeriği %50-55 arasında değişen yüksek alüminaya sahip kil ocağı b) %65 ve üzeri silis içeren ve çözünmez kalıntısının yüksek olması nedeniyle çimento fabrikası tarafından belli bir süre kullanıldıktan sonra kalitenin değişmesi nedeniyle terk edilmiş kil ocağı

Çimento fabrikası kalker ocağına ait farklı kademelerden alınan kalker örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 1'de ve kil örneklerine ait analiz sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan hammadde örneklerinin kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 1. Kalker hammaddesinin kimyasal analiz sonucu (K: Kademe)

İçerik	K1, %	K2, %	K3, %	K4, %
SiO <sub>2</sub>	6,4	23,6	0,51	1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,73	5,96	0,19	0,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8	2,77	0,22	0,24
CaO	50,34	36,3	54,8	53,1
MgO	0,53	0,99	0,47	1,03
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,03	0,02	0,02
K <sub>2</sub> O	0,36	1,02	0,08	0,1
SO <sub>3</sub>	0,04	0,07	0,07	0,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18	0,26	0,02	0,08
TiO <sub>2</sub>	0,09	0,31	0,04	0,04
MnO	0	0,02	0	0
Kızdırma Kaybı	38,86	28,4	43,3	42,9
Toplam	99,35	99,6	99,7	99,7
Rutubet	1,8	2,2	2,3	2,7

Çizelge 2. Kil hammaddesinin kimyasal analiz sonucu (K: Kademe)

İçerik	K1, %	K2, %	K3, %	K4, %
SiO <sub>2</sub>	56,37	66,10	53,19	73,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,96	9,40	14,94	10,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,92	4,73	7,76	5,25
CaO	13,54	5,52	6,25	1,93
MgO	1,39	1,62	2,65	1,71
Na <sub>2</sub> O	0,42	0,41	0,55	0,46
K <sub>2</sub> O	0,91	1,04	1,8	1,13
SO <sub>3</sub>	0,04	0,03	0,04	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,19	0,23	0,22	0,12
TiO <sub>2</sub>	0,48	0,57	1,07	0,6
MnO	0,03	0,02	0,07	0,03
Kızdırma Kaybı	14,48	10,02	11,1	4,8
Toplam	99,73	99,69	99,64	99,68
Rutubet	9,1	5,52	8,6	8,1

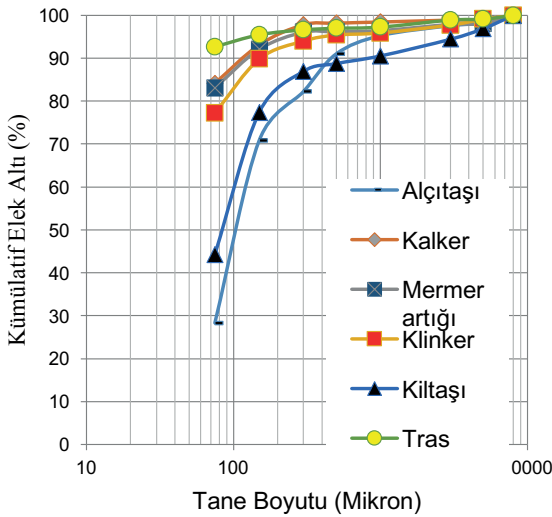
Çizelge 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento hammaddelerinin kimyasal analiz sonuçları

İçerik	Kalker %	Mermer Atığı %	Tras %	Kil taşı %	Klinker 1 %	Klinker2 %
SiO <sub>2</sub>	0,77	9,31	65,89	58,89	20,94	21,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,86	1,98	10,99	16,07	5,37	5,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,73	0,38	5,54	5,1	3,68	3,65
CaO	54,32	48,59	4,11	5,73	66,45	65,73
MgO	0,2	0,34	0,59	1,84	1,10	1,21
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,20	0,17	0,32	0,33
K <sub>2</sub> O	0,03	0,01	1,42	2,23	0,67	0,70
SO <sub>3</sub>	0,21	0,12	2,28	1,84	0,71	0,66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	0,01	0	1,86	0,00	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0	0	0,00	0,00
MnO	0,01	0,01	0	0	0,01	0,00
Kızdırma Kaybı	42,75	39,13	8,21	5,73	0,28	0,28
Toplam	99,93	99,91	99,23	99,46	99,52	99,44
Rutubet	0,8	0,5	0,5	4	0,1	0,1



## 2.2. Öğütme Deneyleri ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çimento hammaddelerinin  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyutta olması istenir.  $D_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m ve altında olan bir ürün elde edebilmek için çimento hammaddelerinden kalker, mermer artığı, klinker, alçıtaşı, tras ve kil taşının laboratuvar tipi bilyalı değirmende ayrı ayrı 4, 8, 12, 15 ve 30 dakika süresince öğütülmüşlerdir. Öğütme işlemi sonucunda tras 8 dakika sonunda  $d_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m'ye ulaşırken, kalker, mermer artığı ve klinker ancak 30 dakika sonunda  $d_{80}$  boyutu 75  $\mu$ m'un altına inebilmiştir. Fakat 30 dakika sonunda kil taşı ve alçıtaşının  $d_{80}$  tane boyutu 75  $\mu$ m'a ulaşamamıştır. Çimento hammaddelerinin öğütülmesi sonucu 30 dakika sonunda elde edilen ürünlerin kümülatif elek altı eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 30 dakika öğütme sonunda ürünlerin elek altı eğrileri

Literatürde 75  $\mu$ m'den daha iri tanelerin hidratasyona katılmadığı belirtilmektedir (Powers, 1939). Bu nedenle dar tane boyu örnekleri 75  $\mu$ m altındaki fraksiyonlardan oluşturulmuştur.

Kil taşının  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'den daha ince boyutta olması istenir. Ancak kil taşı ile 30 dakika sonunda 75  $\mu$ m tane boyutuna inilememiştir. Bunun nedeninin, havada kurutulmuş olan kil taşının içeriğinde bünye neminin bulunması ve bu nemin eleme işleminde topak oluşturarak öğütmede zorluk yaratmasıdır.

Yine alçı taşının  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyutta olması istenir. Ancak alçı taşı ile 30 dakika sonunda 75  $\mu$ m tane boyutuna inilememiştir. Bunun nedeninin, havada kurutulmuş olan alçı taşının içeriğinde bünye neminin bulunması ve bu nemin eleme işleminde topak oluşturarak öğütmede güçlük yaratmasıdır.

Tras hammaddesinin  $d_{80}$  boyutunun 75  $\mu$ m'dan daha ince boyuta öğütülebilmesi için gerekli olan öğütme süresi sadece 8 dakikadır. Tras hammaddesi, çimento eldesi için öğütme süresi bakımından kalker ve kil taşına göre 3,5 kat daha hızlı ufalanmaktadır. Bu sonuçlar bakımdan, tras hammaddesinin HGI değerinin büyük, iş indeksi değerinin küçük olması beklenmektedir.

## 2.3. Hardgrove Öğütülebilirlik Test Sonuçlarının Bond İş İndeksine Çevrimi

Hardgrove öğütülebilirlik testi kömürün öğütülebilirliğinin saptanması için kullanılmaktadır. (Eşitlik 2).

$$HGI=13.6+6.93 \times M \quad (2)$$

Bulunan HGI değerine göre aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir:

HGI>70 ise malzeme kolay öğütülebilir,

HGI=50-70 ise orta derecede öğütülebilirliğe sahip bir malzemedir,

HGI=30-50 ise zor öğütülebilir bir malzemedir.

Portland çimentosu hammaddelerine uygulanan orijinal Hardgrove testi sonucunda Çizelge 4'teki sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, HGI değerleri Bond'un 1954 yılında önerdiği bir eşitlikle İş indeksi ( $W_i$ ) değerlerine dönüştürülmüştür. HGI değerinin iş indeksine dönüşüm formülü aşağıda verilmiştir (Bond, 1954).

$$W_i = \frac{88}{HGI^{0.5}} \quad (3)$$



Çizelge 4. Çimento hammaddelerinin HGI ve  $W_i$  değerleri sonuçları

Hammadde	HGI	$W_i$ (kws/t)
Kalker	86,37	9,47
Klinker	41,32	13,71
Alçıtaşı	94,68	9,04
Kil taşı	127,95	7,78
Tras	89,83	9,27
Mermer atığı	91,91	9,19

Yukarıdaki HGI sonuçlarına göre çimento hammaddelerinden klinker dışında kalan çimento hammaddelerinin HGI değeri 70'in üzerinde çıkmıştır. Buna göre bu hammaddeler kolay öğütülebilen hammaddelerdir. Diğer taraftan, iş indeksleri Çizelge 5'e göre değerlendirilecek olursa; hammaddelerden mermer atığı ve trasın kolay öğütülebildiği, diğer hammaddelerin ise kolay olmakla birlikte kısmen orta öğütmeye daha yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 5. İş indeksi değerine göre öğütülebilirlik sonuçları (Bond, 1954)

İş İndeksi ( $W_i$ )	6-9	10-14	15-20	>20
Öğütülebilirlik	Kolay	Orta	Zor	Çok Zor

Hesaplanan iş indeksi değerlerinin literatür verileri ile karşılaştırılması durumunda, elde edilen sonuçların literatür verileri ile uyumluluk içerisinde olduğu görülmektedir. Örneğin; Nitta vd. (2002) yapmış olduğu bir çalışmada, 22 farklı kireç taşı numunesinin Bond iş indeksi değerini belirlemiş ve iş indeksi değerlerinin 7,75 ile 18,18 kWs/t arasında değiştiğini belirtmiştir. Yıldız (2014) ise, kitabında vermiş olduğu çizelgede, iş indeksi değerlerini kireç taşı için 10,18 kWs/t, kil için 7,10 kWs/t, çimento hammaddesi için 10,57 kWs/t, çimento klinkeri için 13,49 kWs/t olarak belirtmiştir. Hoşten ve Avşar (1997) Set Ankara Çimento fabrikasının

stok sahasından aldıkları kalker ve tras için iş indeksi değerlerini sırasıyla 12,28 ve 10,92 kWs/t olarak bulmuşlardır. Sonuç olarak; kalker, klinker ve tras hammaddeleri için bu çalışmada hesaplanan iş indeksi değerleri literatür verileri ile yaklaşık olarak benzer sonuçlar vermiştir. Hoşten ve Avşar'ın (1998) yapmış olduğu çalışmada klinker ve trasın Bond iş indeksi ve Hardgrove ve hacimsel Hardgrove deneyi sonuçlarını karşılaştırılmış, iş indekslerinin hesaplanmasıyla hacimsel Hardgrove deneyi sonuçlarının, Bond deneyi sonuçlarına standart Hardgrove deneyi sonuçlarından daha yakın olduğu görülmüş ve bu yöntemin hızlı yöntem olarak kullanılabilirliğinin daha doğru olacağı kanısına varılmıştır. Fakat hacimsel Hardgrove deneyi ile bulunan klinkerin iş indeksi, Bond iş indeksine oranla oldukça yüksek bulunmuştur. Bu durum, Hardgrove ve Bond yöntemlerinin öğütme mekanizmalarının tamamen farklı olmasına bağlı olarak malzemelerin öğütmeye karşı değişik dirençler göstermesi nedenine bağlanmıştır. Ayrıca karışımlar için yapılan Hardgrove öğütülebilirlik deneyleri sonucunda elde edilen ürünlerin tras miktarları orijinal malzemeye oranla oldukça fazla bulunmuştur. Bu sonuç Hardgrove yöntemlerinin karışımlar için çok da güvenilir olmadığını göstermektedir. Bu nedenle klinker ve tras karışımları için hacimsel Hardgrove yöntemi standart yöntemle göre daha güvenilir görünmesine rağmen hassasiyet gerektiren durumlarda Bond yönteminin kullanılması en uygunu olacaktır (Hoşten ve Avşar, 1998).

Literatürde Bond test yöntemi Hardgrove test yöntemine göre daha güvenilir kabul edildiği için çimento hammaddelerinin Bond deneyi sonucunda hesaplanan iş indeksleri Çizelge 6'da verilmiştir. Literatürde klinker, kalker, kil ve alçı taşı ile çalışılmış birçok Bond test çalışması ve hesaplanan iş indeksini bulmak mümkündür. Yapılan bu çalışmalara ilave olarak farklı iki tesise ait klinker ve yine literatürde rastlanmaması sonucu kil taşı ve mermer atıkları için de değişik zamanlarda Bond testleri yapılmış ve iş indeksleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda mermer atığı; 11,18 kWs/t, kil taşı (şist) 10,60 kWs/t, birinci çimento üretim tesisine ait klinker 13,65 kWs/t ve ikinci tesise ait klinker ise 14,64 kWs/t olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 6. Klinker ve katkı malzemelerinin bulunan iş indeksleri (Karakaş, 2006)

İçerik	Beslenen $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	Ürün $d_{80}$ ( $\mu\text{m}$ )	Öğünebilme değeri (Gbp)	İş indeksi (kWs/t)
Kalker	2546	94	1,272	13,85
Klinker	2308	112	1,463	13,96
Tras	1909	108	1,737	12,19
Alçı taşı	2308	102	1,618	12,11
Karışım	2000	109	1,519	13,59

Tüm değerlendirmeler ışığında çimento ham maddeleri ile yapılan Bond iş indeksi sonuçları karşılaştırıldığında (Çizelge 6) öğütülebilirlik kolaydan zora doğru sıralanacak olursa;

kil taşı < alçı taşı < tras < kalker < klinker

şeklinde olduğu görülmektedir. Yine kalkere alternatif olarak kullanılan mermer atıkları için hesaplanan iş indeksinin kalkerin iş indeksinden küçük olduğu görülmektedir. Burada kil taşının en düşük iş indeksine sahip olmasında en büyük rolün silis içeriğinin düşük olması (%50-60) ve mermer atığının iş indeksinin kalkerin iş indeksinden daha düşük olmasının nedeni ise mermer atıkları ile beraber stokta traverten atıklarının da karışım halinde bulunması ve traverten atıklarının porozitesinin yüksek olması yani boşluklu yapılaraya sahip olması ve altere özellikler içerdiğinden sertliğinin az da olsa azaldığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Karakaş (2006) Bond iş indekslerinden yola çıkarak katkı çimento karışımlarını

(kalker+tras+cüruf+alçı taşı) temel olarak yaptığı öğütülebilirlik karşılaştırmalarında klinker ve katkı maddelerinin ayrı ayrı ve beraber öğütülmeleri durumunda birlikte öğütmenin (13,59 kWs/t), ayrı ayrı öğütmeye (14,90 kWs/t) göre daha fazla enerji ihtiyacı gerektirdiğini görmüştür. Birlikte öğütmede klinker yerine puzolanik malzeme kullanılması öğütmeyi kolaylaştırmakta ve iş indeksini düşürmektedir. Puzolanik malzeme katılarak Cem IV 32,5 R çimento üretiminde %55'e kadar tras ilave edilebilmektedir (TS EN 197-1, 2012). Katkı oranı arttıkça öğütme kolaylaşmakta ve öğütme enerjisi de düşmektedir. Burada yine en önemli faktörlerden biri trasın porozitesinin yüksek, gevrek ve kırılğan bir yapıya sahip olması ve bu sayede kolay öğütülmesidir. Ayrıca öğütülebilirliğinin Bond iş indekslerinden de görüldüğü gibi klinkerinde daha düşük olması ile açıklanabilmektedir. Kaldı ki yapılan endüstriyel çalışmaların sonuçları da bunu desteklemektedir.

Hoşten ve Avşar (1997), trasın iş indeksini 11,65 kWs/t ve klinkerin iş indeksi 13,90 kWs/t olarak bulmuştur. Bond iş indeksleri, trasın klinkere oranla daha kolay öğünür bir malzeme olduğunu, buna ek olarak klinker ve trasın belirli oranlarda karıştırılmasıyla hazırlanan malzemelerin, bu iki çimento hammaddesine göre daha zor öğündüğünü göstermiştir.

Endüstriyel çalışmalar doğrultusunda iki farklı çimento üretim tesisine ait iki farklı hammadde kompozisyonları oluşturulmuş (Çizelge 7) ve hammadde kompozisyonu aynı tip ve aynı kapasiteye ve üreticiye ait farklı iki dikey değirmende öğütülmüştür. Endüstriyel değirmende bir ay süresince her saat 90  $\mu\text{m}$  incelik testleri yapılarak aylık sonuçlar karşılaştırmalı olarak Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 7. Hammadde kompozisyonları

İçerik	Kalker %	Mermer Atığı %	Kil taşı %	Demir cevheri %	Boksit %
Ham Karışım-A	78,70	0	19,30	2	0
Ham Karışım-B	40	32	25	2	1

Çizelge 8. Hammadde karışım kompozisyonları ve klinkerlerin incelik tablosu (90 µm üzeri bakiye %'si).

HAM KARIŞIM-A	HAM KARIŞIM-B	KLİNKER-A	KLİNKER-B	KLİNKER-A	KLİNKER-B
90 µm %	90 µm %	90µm, 35 dakika %	90µm, 35 dakika %	90µm, 45 dakika %	90µm, 45 dakika %
16,7	13,5	3,2	2,5	1,7	1,3
16,4	13,4	2,6	1,9	1,8	1,1
11,1	13,4	2,8	2,6	3,0	1,1
17,4	14	2,4	2,2	2,1	1,2
17,3	13	2,2	2,4	2,2	1,2
17,4	12,6	3,3	2,8	2,2	1,5
17,4	11,9	3,8	2,8	1,5	1,1
16,3	12,9	1,9	2,0	3,5	1,3
17,2	12,7	2,2	2,1	2,8	1,5
16,8	12,4	2,4	2,4	2,5	1,1
17,5	12,2	3,0	2,6	1,9	1,4
17,4	12,1	2,8	2,3	1,8	1,8
16,5	12,0	2,6	3,0	1,7	1,2
15	12,5	2,8	2,8	2,0	2,8
15,7	12,2	3,0	2,8	1,3	1,1
15,9	11,5	3,2	2,2	1,8	1,3
15	11,8	3,5	3,0	2,1	1,6
15,9	11,8	2,6	2,4	1,8	1,0
15,9	12,1	2,8	1,8	1,9	1,3
16	12,1	2,6	2,5	1,6	1,6
16,6	12,9	2,6	2,3	1,8	1,6
16,9	13,6	2,8	2,4	1,6	3,1
17,1	12,9	2,2	2,5	1,5	1,6
17,3	13,4	2,6	2,4	1,6	2,7
17	13,4	3	2,8	1,6	1,5
17,2	13,2	2,2	2,5	1,8	1,8
17,5	13,2	2,2	2,2	2,2	1,4
17,5	12,3	2,6	2,5	2,1	1,6
17,9	11,7	3,0	2,8	1,7	1,3
17,0	12,3	3,1	2,9	1,3	1,8

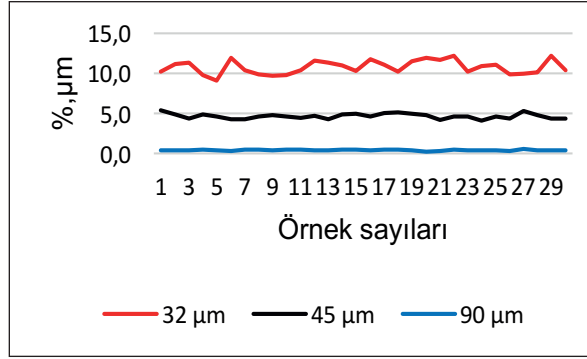
Çizelge 8'e göre ham karışım-A ham karışım B'den daha yüksek inceliğe sahiptir. Besleme miktarları

ve kapasiteleri aynı olmasına karşın aradaki incelik farkının kullanılan hammaddelerin kimyasal özellikleri, sertlik ve mineralojisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Farklı iki tesiste üretilmiş klinkerlerle 300 mmx300mm hacimli laboratuvar tipi bilyalı değirmende sırasıyla 35 ve 45 dakika sürelerde öğütme testi yapılmış ve 90 µm incelikte % elek üstü bakiyeleri incelenmiştir. İlk 35 dakika öğütme süresi boyunca A klinkeri B klinkerine göre elek üstü bakiyesi daha yüksektir. Fakat 45 dakika öğütme süresince aradaki fark daha da azalmaya başlamış fakat yine A klinkerinin elek üstü bakiyesi B klinkerinden fazla olmuştur. Klinkerlerin mineralojik yapıları öğütmeyi ciddi derecede etkilemektedir. Öğütme süresi arttıkça klinkerin inceliği artmakta fakat öğütme süresinin artması ile birlikte istenilen incelik hedefine ulaşılrken diğer taraftan öğütme için gerekli enerji miktarı da artmaktadır. Burada asıl olan öğütmeye konu olan malzemeyi iyi tanımaktır. Klinkerin mineralojisi incelendiğinde sahip olduğu alit, belit miktarları dikkatlice incelenmelidir. Çünkü bilinmektedir ki alit miktarı artması öğütmeyi kolaylaştırmakta ve belit miktarının artması ise öğütmeyi zorlaştırmaktadır (Korkmaz, 2010). Yine klinker bünyesinde var olan serbest kireç miktarının artması öğütmeyi kolaylaştırmakta fakat çimento dayanımlarını düşürdüğünden dolayı klinker bünyesinde istenmediği için belli standartlar dahilinde kısıtlanmaktadır.

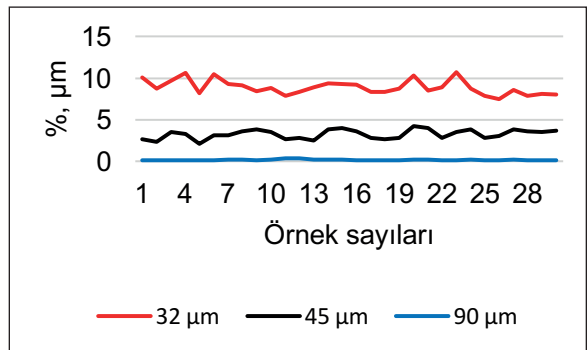
Endüstriyel çalışmalar doğrultusunda farklı iki tesiste fakat özdeş iki değirmene ait Cem I 42,5R ve Cem IV 32,5 R çimento üretimi esnasında gün içerisinde belirli saatlerde incelik testleri için örnekler alınarak günlük ortalama bulunmuş ve bir ay süresince 32,45 ve 90 µm incelik değerleri test edilmiştir.

Şekil 5'te Cem I 42,5 R-A üretiminde birinci gün 32 µm elek üstü bakiyesi 10 µm incelikte başlamış, 10-12 µm arasında seyretmiştir. 45 µm inceliğe yükseldiğinde 4-6 µm aralığında ve özellikle 90 µm'da inceliğin düşmesi ile birlikte sabit bir seyir izlemiştir.



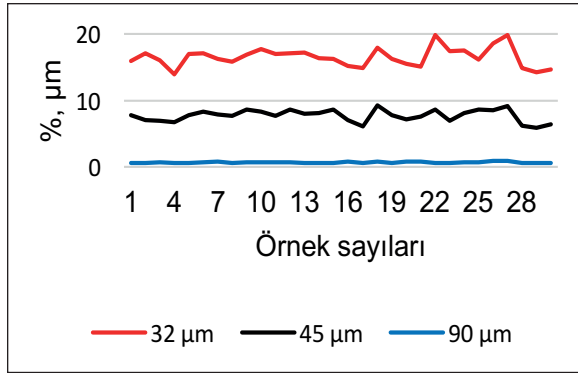
Şekil 5. Cem I 42,5 R-A incelik eğrisi

Şekil 6'da Cem I 42,5 R-B çimentosu 10 µm incelikte başlayıp 8 µm ve daha sonra 12 µm ve tekrar 8 µm incelikte son bulmuştur. 45 µm incelikte daha stabil bir seyir izlemiştir ve 2 µm inceliğe kadar düşmüştür. Burada B değirmeninin A değirmenine göre daha fazla enerji tüketeceğini söyleyebiliriz. Çünkü daha ince çimento üretmek için değirmene ya daha az malzeme besleme gerekmekte bu da düşük besleme şarjı ile daha fazla enerji tüketeceği anlamına gelmektedir. Burada önemli olan diğer bir parametre klinkerin mineralojik özellikleri, kalitesi stabil olduğunda ya da değirmen içerisine kolay öğütebilir bir klinker girmesinde ve stabil proses şartlarının da da benzer durum görülecektir.



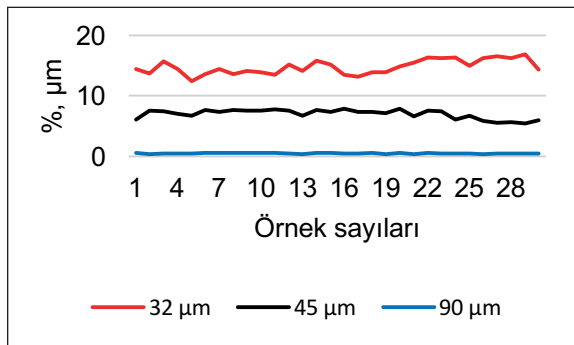
Şekil 6. Cem I 42,5 R-B incelik eğrisi

Şekil 7'de Cem IV 32,5 R çimentosu 32 µm elek üstü değeri 16 µm ile 20 µm arasında değişmektedir. 45 µm elek üstü değeri ise 5 µm ile 10 µm arasında değişmektedir. 90 µm incelik 1 µm'un altında stabil bir şekilde seyretmiştir.



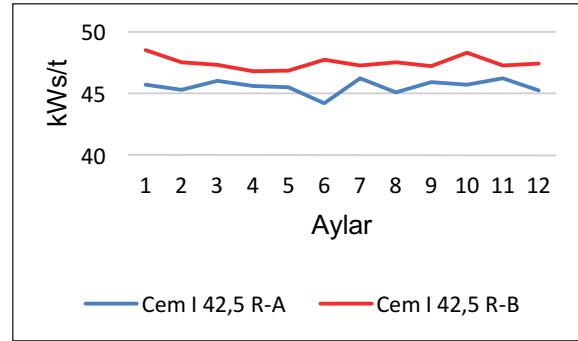
Şekil 7. Cem IV/B 32,5 R-A incelik eğrisi

Şekil 8'de Cem IV 32,5 R-B çimentosu yaklaşık 17  $\mu\text{m}$  ile başlayıp 18  $\mu\text{m}$  üzerine çıkmıştır. Yer yer 16  $\mu\text{m}$  ile 14  $\mu\text{m}$  arasında değişken şekilde ilerlemiştir. 45  $\mu\text{m}$  elek bakiyesi 6  $\mu\text{m}$  ile 8  $\mu\text{m}$  arasında daha stabil bir şekilde ilerlemiştir. Yine elek açıklığının artması ile birlikte 90  $\mu\text{m}$  elek üstü bakiyesi daha stabil kalmıştır.



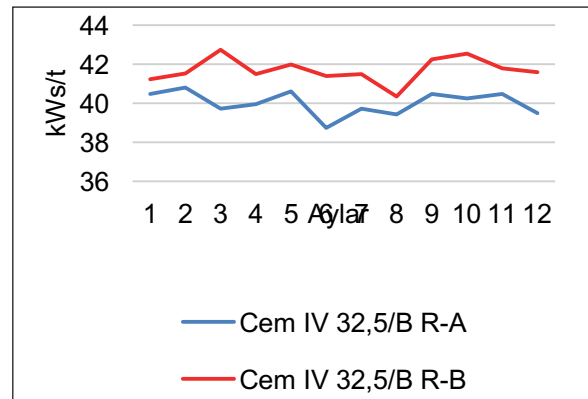
Şekil 8. Cem IV 32,5/B R-B incelik eğrisi

Her iki katkı çimento örneği de incelendiğinde Cem IV 32,5/B R-A katkı çimento örneğinin daha ince öğütüldüğü görülmektedir. Her iki katkı çimento örneği (Cem IV 32,5/B R-A) Cem I 42,5 R, A-B çimento örnekleri ile karşılaştırıldığında incelik değerlerinin katkı çimentolarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu da Cem IV 32,5 R katkı çimentoların öğütülmesi için gerekli enerji maliyetinin daha düşük olduğu anlamına gelmektedir. Endüstriyel bilyalı değirmenlerden özdeş her iki değirmen karşılaştırılması yapıldığında Cem IV 32,5 R katkı çimento üretimi için harcanan enerjinin Cem I 32,5 R puzolanik çimento üretimi için harcanan enerjiden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 9-10).



Şekil 9. Cem I 42,5 R çimento öğütme enerjisi karşılaştırma grafiği

Şekil 9'da Cem I 42,5 R üretimi için bilyalı değirmenlerde endüstriyel bazda harcanan enerji A çimentosu için harcanan enerjinin B çimentosundan daha az olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeni değirmeni tam kapasite ya da üzerinde bir kapasiteyle çalıştırılması veya düşük incelikte değirmenin çalıştırılması olabilir. Yine diğer bir husus ise klinker üretim proseslerinin düzgün şekilde stabil olarak çalışması ve klinkerleşmenin tam olarak sağlandığı ürünlerdir.



Şekil 10. Cem IV 32,5/B-R çimento öğütme enerjisi karşılaştırma grafiği

Şekil 10'da Cem IV 32,5 R için gerekli olan enerji ihtiyacı A çimentosu için gerekli enerji B çimentosundan daha azdır. Burada çimento hammaddeleri için tras kullanıldığı için trasın silis içeriği, rutubeti ve çözünmez kalıntısı çok önemlidir. Ayrıca yine klinkerin mineralojik yapısı kadar çimento öğütme prosesinin de stabil çalışması çok önemlidir. Trasın rutubeti bazı durumlarda yüksek olup yüksek rutubete sahip



olan trasın doğrudan değirmene beslenmesi değirmenlerde besleme tonajını düşürmekte, rutubeti azaltmak için daha fazla sıcak havaya ihtiyaç duyulmaktadır. Klinker soğutma hattından gelen sıcak havanın bazı zamanlarda debisi azalmakta bazı zamanlarda ise sıcaklığı azaldığından dolayı değirmen içerisindeki rutubeti azaltmak için gerekli ısıyı sağlayamamaktadır. Bu da maalesef değirmen üretim kapasitesinin düşmesine, değirmende bilyalara ve diyafram plakalarına sarma yapışma yaparak değirmen çalışma verimini düşürmekte ve bu da sonuç olarak değirmen enerji tüketimlerini artıran bir sebep olarak karşımıza çıkmaktadır.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Hammaddelerin ve klinkerlerin kendilerine has karakteristik özelliklerinin yani kimliklerinin doğru ve tam olarak bilinmesi öğütmenin etkinliği ve kontrolü açısından oldukça önemlidir. Klinkerin öğütülebilirliğinde kimyasal ve mineralojik bileşim önemli rol oynar. Silikat modülü arttıkça (bünyedeki silis) öğütülebilirliğin azaldığı, ayrıca  $Al_2O_3$  ve serbest kireç artmasıyla yine öğütülebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Çimento hammaddelerinden kil mineralleri, bünyesinde  $SiO_2$  bulundurup silikat modülünü ayarlayan ana mineraldir. Dolayısıyla kimyasal özelliklerin ocak kademelerinde çok çabuk değişmesinden dolayı doğru şekilde ve doğru yerden numunelerin alınması ve analiz sonuçlarına göre üretim proseslerinin dizayn edilmesi ve sürdürülmesi önemlidir.

Bunların yanısıra klinkerlerin öğütülebilirliğinde mikro yapının da önemi vardır. Mikro yapının oluşumunda soğutma hızı ve fırın tipi etkilidir. Klinkerlerin öğütülebilirliğinde hammaddenin yanısıra pişirme ve soğutma proses şartlarının da etkili olduğu bilinmektedir. Fırın şartlarının değişmesi ise tamamen fırına giren malzemenin kalitesine bağlıdır. Bu sonuç ise yine çimento üretiminde doğru hammadde seçimini göstermektedir. Bundan sonra yapılacak değirmen optimizasyonlarında optik mikroskop görüntü işleme tekniklerinden faydalanılarak klinkerlerin mineralojisi, fazların oranı ve tane boyut dağılımları da göz önüne alınarak modelleme ve simülasyon çalışmalarında dikkate alınması faydalı olacaktır.

Çimento hammaddelerinin ve klinkerlerin öğütme testlerinde Bond yönteminin uzun ve zahmetli olması ve son zamanlarda yapılan araştırmalarda tekrarlı testlerde birtakım tutarsızlıklar görülmesi nedeniyle Bond yöntemine karşılık Hardgrove yöntemi de alternatif olarak seçilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Test sonuçları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Hardgrove;

kil taşı<alçı taşı<mermer atığı<tras<kalker<klinker

Bond iş indeksi;

kil taşı<mermeratığı<alçı taşı<tras<kalker<klinker.

Hardgrove ve Bond iş indeksleri birbirlerinden farklı sonuçlar vermiştir. Fakat kendi içlerinde minerallerin iş indeksleri karşılaştırıldığında klinker, kalker ve trasın; mermer atıkları, alçı taşı ve kil taşından zor öğündüğünü ve mermer atıkları, alçı taşı ve kil taşının öğütülebilirliğinin de birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu nedenle Bond ve Hardgrove testlerinin birbirleri ile kıyaslandığında tutarsızlıklar olduğu fakat her iki test yönteminin de kendi içinde tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bütün aksaklıklara karşılık Bond ve Hardgrove formülleri özellikle bilyalı değirmenler için şu an tek dizayn ve kontrol mekanizmasıdır. Fakat mevcut teoriler tekrar gözden geçirilmeli ve yeni teoriler ortaya atılmalıdır ve daha güvenilir enerji hesaplamaları yapılmalıdır.

Endüstriyel çalışmalar neticesinde farklı tesislere ait klinkerlerle yapılan çimentoların incelik değerleri ve enerji tüketimlerinde de farklı sonuçlar görülmüştür. Malzemedeki ince ürün miktarı arttıkça değirmenlerin tüketmiş oldukları enerji miktarları da artmıştır. Ayrıca katkılı çimentolarla yapılan öğütme testleri sonucu enerji tüketim miktarı katkısız çimentolardan daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi öğünmesi zor klinker yerine öğünmesi daha kolay katkı malzemelerinin ikame edilmesidir.

## KAYNAKLAR

Alp, İ., Deveci, H., Yazıcı, E. Y., Türk, T., and Süngün, Y. H., 2009. Potential Use of Pyrite Cinders As Raw Material in Cement Production: Results of Industrial Scale Trial Operations. Journal of Hazardous Materials, 166(1), 144-149.

- Benzer, H.,2005. Modeling and Simulation of a Fully Air Swept Ball Mill in a Raw Material Grinding Circuit. *Powder technology*, 150(3), 145-154.
- Bond, Fred C., 1961, Kırma ve Öğütme Hesapları, Bölüm I-II., *Br. Chem. Müh.* , 6 : 378-385, 543-548.
- Çolak, S. S., 2018. Çimento Öğütme Uygulamalarında Bilya ve Malzeme Özelliklerinin Bilya Aşınma Sonuçları Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Deniz, V., Erkan, D., ve Alyıldız, V., 2001. Kalker ve Klinker Örneğinde Kırılma Kinetiği Üzerine Bilya Çapının Etkisi. 4 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 118-19 Ekim 2001.
- Gouda, G.,1979. Klinker Bileşiminin Öğütülebilirlik Üzerindeki Etkisi. Çimento ve Beton Araştırmaları , 9(2), 209-218.
- Hardgrove, T. A.,1932. Infection with Monilia Following Extraction of Teeth. *Journal of the American Dental Association*, 19(3), 483-486.
- Hoşten, Ç., Avşar, Ç., 1997. Çimento Klinkeri ve Tras Karışımlarının Öğütülebilirlik Özellikleri. Türkiye 15. Madencilik Kongresi, Zonguldak, s. 291-298.
- Hoşten, C., Avsar, C.,1998. Grindability of Mixtures of Cement Clinker and Trass. *Cement and Concrete Research* concrete research, 28(11), 1519-1524.
- Hoşten, C., Fidan, B., 2012. An Industrial Comparative Study of Cement Clinker Grinding Systems Regarding the Specific Energy Consumption and Cement Properties. *Powder Technology*, 221, 183-188.
- Karakaş, F., 2006. Çimento Hammaddelerinin Öğütülmesinde Enerji Optimizasyonu. Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Korkmaz, A., 2012. Klinker Ana Komponentlerin Öğütme ve Çimento Dayanımları Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Nitta, S., Bissombolob, A., Furuyamab,T., Mori, S., 2002. Relationship Between Bond's Work Index (Wi) and Uniformity Constant (n) of Grinding Kinetics on Tower Mill Milling Limestone. *International Journal of Minereral Processing*, No. 66 s. 79–87.
- Smith, J. V., 2013. *Feldspar Minerals: Crystal Structure and Physical Properties 1*. Springer Science and Business Media.
- Sahasrabudhe, R., Sistu, P., Sardar, Sahasrabudhe, R., Sistu, P., Sardar, G., and Gopinath, R., G. A. U. T. A. M., Gopinath, R. A. V. I., 2006. Control and Optimization in Cement Plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(6), 56-63.
- Speight, J. G., 2012. *The Chemistry and Technology of Coal*. CRC Press.
- Venkatanarayanan, H. K., Rangaraju, P. R., 2015. Effect of Grinding of Low-Carbon Rice Husk Ash on the Microstructure and Performance Properties of Blended Cement Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 55, 348-36.
- Yıldız, N., 2014. *Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme*. Cilt 1. Ankara.





Orijinal Araştırma / Original Research

## TRİBOELEKTROSTATİK AYIRMA İLE İNCE BOYDA KÖMÜR ZENGİNLEŞTİRİLMESİNİN İNCELENMESİ

THE INVESTIGATION OF FINE COAL BENEFICIATION WITH TRIBOELECTROSTATIC SEPARATION

Ergin Gülcan<sup>a,\*</sup>, T.Onur Dizdar<sup>b,\*\*</sup>, Gizem Kocausta<sup>b,\*\*\*</sup>, Özcan Y.Gülsoy<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Labris Madencilik, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 12 Mayıs / May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 05 Haziran / June 2020

### Anahtar Sözcükler:

Triboelektrostatik ayırım,  
Kömür.

### Keywords:

Triboelectrostatic separation,  
Coal.

### ÖZ

Bu çalışma kapsamında bir triboelektrik ayırım düzeneği tasarımı ve bu düzeneğin ülkemizdeki belli başlı kömür cevherlerinin ince boyda zenginleştirilmesinde kullanımı incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Tunçbilek ve Soma bölgelerinde konumlanmış, işletmesi devam eden dört farklı lavvardan kömür numuneleri temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde geliştirilen triboelektrostatik ayırım düzeneği 35 kV'a kadar statik yük üretebilmektedir. Gerekli statik yükün sürtünme ile sağlanmasına ilişkin öncül testleri takiben kömür numuneleri ile zenginleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İki ayrı bölgeden temin edilen dört farklı kömür numunesi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, triboelektrostatik ayırım ile kömürün yapısına bağlı olarak ince tane boylarında %50'leri aşan kül uzaklaştırma verimleri elde edilebildiği görülmüştür.

### ABSTRACT

The scope of this study is to design a triboelectric separation equipment and to investigate its use in the enrichment of the major coal samples in our country. Coal samples were obtained from four different operating plants in Tunçbilek and Soma regions for the use in experimental studies. Triboelectrostatic separation mechanism developed in Hacettepe University Mining Engineering Department was proved to provide up to 35 kV for the use in experimental studies. Following the preliminary tests regarding the required static load by friction, enrichment processes were carried out with coal samples. As a result of the experimental studies carried out with four different coal samples obtained from two different regions, it has been observed that with the triboelectrostatic separation, ash removal efficiencies exceeding 50% in fine grain sizes can be obtained depending on the structure of the coal.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: [ergingulcan@hacettepe.edu.tr](mailto:ergingulcan@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-8861-8061>

\*\* [dizdaronur@gmail.com](mailto:dizdaronur@gmail.com)

\*\*\* [gizemkocausta@gmail.com](mailto:gizemkocausta@gmail.com)

\*\*\*\* [ogulsoy@hacettepe.edu.tr](mailto:ogulsoy@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-7063-7432>

## GİRİŞ

Cevher zenginleştirme süreçleri, minerallerin fiziksel, kimyasal, elektriksel, manyetik ve optik özelliklerinden yararlanarak değerli mineralleri değersiz minerallerden ayırmayı amaçlar. Elektrostatik ayırıcı ile malzemelerin zenginleştirilmesi bu yöntemlerden biridir ve ilk olarak 1800'lü yılların sonunda kullanılmaya başlanmıştır (Kelly ve Spottiswood, 1982). Elektrostatik ayırma temelde, malzemelerin iletken, yarı iletken veya yalıtkan özellikte olmalarından faydalanılarak gerçekleştirilen bir ayırım türüdür (Mular vd., 2002). İletken malzemeler düşük iletkenlik direncine sahiptirler ( $10 \cdot 10^{-2} \Omega.m$ ). Yarı iletken malzemeler ise  $1 \cdot 10^{-2}$  ile  $10^2 \Omega.m$  arasında iletkenlik direncine sahip olmakla birlikte yalıtkan malzemelerin iletkenlik direnci  $10^{12} \Omega.m$  olarak hesaplanmıştır (Telford vd., 1990).

Günümüzde elektrostatik ayırıcı çeşitleri levha tipi ayırıcılar ve döner tambur tipi elektrotlu ayırıcılar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Her iki tip elektrostatik ayırıcı, tanelerin yüzey iletkenliğine bağlı olarak çalışmaktadırlar (Hangsubcharoen, 1999(a)(b); Wills ve Munn, 2006). Elektrostatik kuvvetlerden yararlanılarak yapılan ayırmalarda en etkin parametre, bir tanenin yüküne bağlı olarak farklı bir yüke sahip bir elektrot tarafından çekilmesi veya itilmesidir. Burada etkileşim içerisinde olan yüklerin büyüklüğü ayırım performansı açısından önem kazanmaktadır. Çizelge 1'de minerallerin farklı yükleme metotları ve farklı yükleme ekipmanlarıyla zenginleştirilmesi ve belli başlı bazı çalışmalar özetlenmiştir.

Bu yöntemlerden triboelektriklenme, tribo-yüklenme (tribocharging) etkisiyle tanelerin doğal yüzey yüklerinin değiştirilmesi prensibine dayanır. Birbirine dokunan/sürtünen taneler arasında moleküler düzeyde kimyasal bağlar oluşmakta, bu oluşan bağların kopması ile birlikte de moleküller arasında elektron alışverişi gerçekleşmektedir (Bittnera vd., 2014; Iuga vd., 2001). Triboelektrik seri ise, farklı malzemelerin birbirlerine dokundurularak/ sürtülmeleri ile oluşacak yüklerin miktarı ve yönü hakkında oldukça genel bir bilgi veren malzeme skalasına verilen addır. Birbirinden oldukça farklı polimer yapılar, metaller, mineraller, günlük hayatta kullandığımız birçok malzeme triboelektrik seride

farklı yerlerde bulunmaktadır. Triboelektrik serinin pozitif tarafında bulunan bir malzeme ile negatif tarafta bulunan herhangi bir malzemeye sürtüldüğünde/dokundurduğunda bunlardan birisi pozitif, diğeri negatif yükle yüklenir. Bu malzemeler triboelektrik seri üzerinde birbirlerine ne kadar uzaklarsa, yük yoğunluğu da o kadar fazla olmaktadır (Diaza ve Felix-Navarro, 2004; Park vd., 2008; Wu vd., 2013; Panat vd., 2014).

Tribo-elektriklenme ile elektriklenme sonrası elektrostatik ayırıcıda ayırma ilişkin mevcut çalışmalardan bazıları potasyum klorür (sylvite), sodyum klorür (halite), barit, feldspat, florit, dolomit, kuvars, apatit, kil mineralleri, kömür, kalsit, fosfor olarak sıralanabilir (Li vd., 1999; Tao ve AL-hwaiti, 2010; Bittnera vd., 2014; Mirkowska vd., 2014; Wang vd., 2014).

Ülkemizde ve dünyada kömür zenginleştirme işlemleri genellikle yaş ve fiziksel yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. İri tane boylarında ve yüksek kapasitelerde oldukça verimli sonuçlar alınan bu yöntemlerin ince boylarda oldukça zor ve problemlili olduğu bilinmektedir. Bu sorunlardan bazıları düşük verim, susuzlandırma sorunu, yaş yöntemin neden olabileceği kimyasal drenaj, bozulmuş kimyasal içeriklerin tekrar kullanımı gibi kirlilik yaratabilecek durumların oluşması şeklinde sıralanabilir. Bu kapsamda kömür üretim ve zenginleştirme endüstrisinde ince boyda toz kömürün zenginleştirilmesine yönelik alternatif yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tribo-elektriklendirme ile elektrostatik ayırmaya ilişkin birçok çalışma son dönemde literatürde yer bulmuştur. Bunlarla birlikte yanmamış karbonu külden ayırmak amacıyla uygulamalar da yapılmaktadır (Cangialosi vd., 2008; Dwari vd., 2009; Tao vd., 2009; Xin-xi vd., 2009; Tao vd., 2011; Zhang vd., 2012; Chen ve Honaker, 2015; Dwari vd., 2015). Chen ve Honaker (2015) döner tambur tipi triboelektrostatik ayırıcıyla saf silika ve kömür karışımı kullanarak gerçekleştirdiği testlerde kömürün %72,58'inin pozitif yüklenebildiğini tespit etmiş, buna rağmen yüksek kalitede nihai bir temiz ürün elde edilemediği sonucuna varmıştır. Dwari vd. (2015) ise oldukça düşük kaliteli ve düşük nemli Hint kömürlerinde yaptığı testlerde %53 kül içeriğine sahip kömür numunesinden %35 verimle %35 kül içeren bir ürün elde edilebildiğini rapor etmiştir. Literatürde sürtünme yoluyla elde edilen



statik yükün şist üzerindeki etkisinin incelendiği pek çok çalışma da mevcuttur. Bu çalışmalarda yüksek şist içeriğinin negatif, kömürün ise pozitif yüklendiği belirtilmektedir. Bu sayede kömür yapısındaki silikatlar, sülfürlü mineraller, karbonatlı içerikler (dolomit) ve benzeri safsızlıklar verimli bir şekilde uzaklaştırılabilmektedir (Alfano vd., 1985; Finseth vd., 1993; Dwari vd., 2009; Chen ve Honaker, 2015).

Ülkemiz kömürlerinin ince tane boylarında triboelektrostatik ayırma ile zenginleştirilmesinin incelenmesi yukarıda belirtilen sebeplerden ötürü önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında Soma ve Tunçbilek bölgelerinden temin edilen kömür numunelerinin, Hacettepe Üniversitesi laboratuvarlarında geliştirilen Triboelektrostatik ayırıcı ile zenginleştirilebilirlikleri incelenmiştir.

Çizelge 1. Minerallerin farklı yükleme metotları ve farklı yükleme ekipmanlarıyla zenginleştirilmesi

Yükleme Methodu	Yükleme Ekipmanı	Malzemeler (Ekipman referansları)
İndüksiyon	Döner Tambur	Cüruftan alüminyum ayırma (Kelly ve Spottiswood, 1982), Feldspat/kuvars (Mular vd., 2002), Bor mineralleri (Saeki, 2010), Yanmamış karbon (Hangsubcharoen, 1999(a)), Cu/Cam fiber/reçine (Hangsubcharoen, 1999(b); Wills ve Munn, 2006)
	Plaka	Rutil/Zirkon (Tilmatine vd., 2009) Titanyum
	Bant	Soğan tohumları, Çiçek (Younes vd., 2013)
Korona	Döner Tambur	Plastik/alüminyum (Zeghloul vd., 2016), Nadir Metal (Richard vd., 2016), Rutil/Zirkon/Kuvars (Tripathy vd., 2010), Çay yaprakları/Yaprak sapı (Higashiyama ve Asano, 1998), Cu/PVC (Bittnera vd., 2014; Iuga vd., 2001)
	Bant	Havuç/Kereviz tohumu (Das vd., 2009)
Triboelektriklenme	Silindirik Elektrot	KCl/NaCl(Allen, 2000)
	Siklon	Kömür (Iuga vd., 2016; Wei and Realf, 2005)
	Döner Koni	Kömür (Çelik ve Yaşar, 1995)
	Yükleme Tüpü	Kömür (Li vd., 1999; Tao ve AL-hwaiti, 2010)
	Kaynar Yatak	Kömür (Mirkowska vd., 2014), Plastik (Wang vd., 2014)
	Elektrostatik elek	Kömür (Ban vd., 1997)
	Kırıcı	Kömür (Soong ve Schoffstall, 2001)
	Döner Boru	Plastik (Baltrus vd., 2002)
	Titreşimli Besleyici	Plastik (Dwari ve Hanumantha, 2006)

## 1. MALZEME VE YÖNTEM

### 1.1. Triboelektrostatik Ayırıcı Deney Düzeneklerinin Oluşturulması

Bu çalışma kapsamında geliştirilen ayırıcıya ilişkin teknik ve operasyonel hususlar, yazarların önceki çalışmalarında detaylı olarak özetlenmiştir (Dizdar vd., 2018).

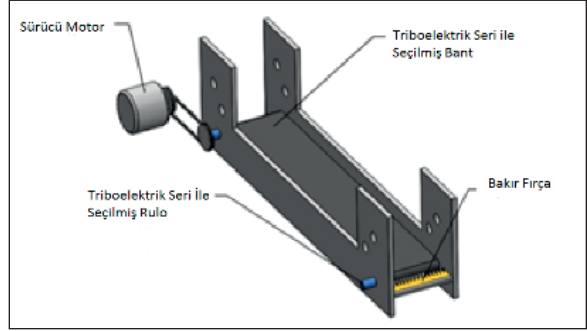
Tasarlanan triboelektrostatik ayırıcı temel olarak 2 bölümden oluşmaktadır. Ayırıcının birinci kısmı, sürtünme ile düzenli olarak elektriğin üretilebildiği bir düzenekten oluşmaktadır. İkinci kısımda ise geleneksel bir ayırım tamburu, besleyici ve birinci kısımda üretilen elektriğin aktarıldığı plakalar bulunmaktadır.

Birinci kısımda triboelektrik üretmek amacıyla triboelektrik serinin zıt uçlarındaki malzemelerden "rulo" ve "bant"lar üretilmiştir. Bantların ve ruloların değiştirilebilir olması sağlanarak en verimli statik yük üretim kombinasyonlarının denenmesi sağlanmıştır. Bant ve rulolar için kullanılan malzemelerin türleri Çizelge 2'de verilmiştir. Ruloların hepsi sabit uzunlukta olup çapları 2 cm olarak seçilmiştir.

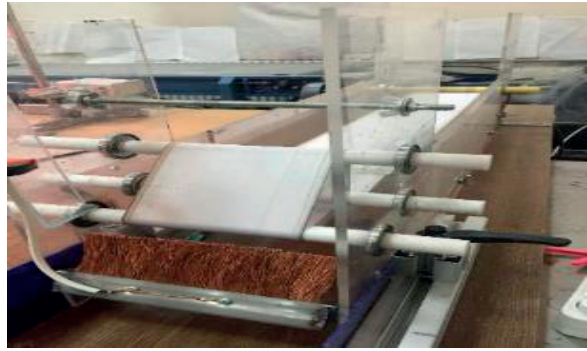
Çizelge 2. Statik elektrik üretiminde kullanılan malzemeler

Elektrik üretimi için kullanılan bant türleri	Naylon, Poliüretan (büyük delikli ve küçük delikli dokuma), Yün, Polyester, Polyester-akrilik, PVC, Fiber/naylon, Fiber
Elektrik üretimi için kullanılan rulo türleri	Teflon, Kestamid, Polyamid, Alüminyum, Delrin, Polietilen

Üretilen elektrik yüklerini toplamak amacıyla bakır fırçalar (toplaç) kullanılmıştır. Bakır fırçalar iletken bir kablo yardımıyla ayırım yapıldığı bölümde bulunan elektrotla bağlanarak ayırım yapılabilmesi için gereken elektriğin elektrotta toplanması sağlanmıştır. Elektrik üretim ünitesinin şematik ve genel görünümü Şekil 1'de ve Şekil 2'de verilmiştir. Testlerde farklı rulo tiplerinin etkisini belirlemek amacıyla seçilmiş olan malzemelerden hazırlanmış olan rulolar Şekil 3'te verilmiştir. Her bir rulodan 6 adet hazırlanmış ve isteğe bağlı olarak kullanılan rulo sayısı test sırasında değiştirilmiştir.



Şekil 1. Elektrik üretim ünitesi şematik çizimi



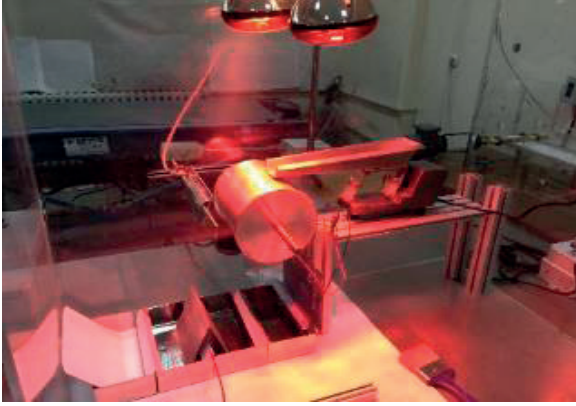
Şekil 2. Elektrik üretim düzeneği, rulolar, bant ve bakır fırça



Şekil 3. Düzenekte kullanılan rulolar

Zenginleştirme ünitesi tasarımında ise tamburlu elektrostatik ayırıcıdan esinlenilmiştir. Bu bağlamda ünite bir tambur, titreşimli besleyici ve elektrotlardan oluşmaktadır (Şekil 4).

Tambur ile alüminyum elektrot arasındaki mesafe ayarlanabilir şekilde kurulum gerçekleştirilmiştir. Titreşimli besleyici ise malzemeleri düzenli bir şekilde, istenilen hızda beslemeyi sağlamaktadır. Her ne kadar zenginleştirme öncesinde numuneler kurutulsa da konvansiyonel ayırıcılarda olduğu



Şekil 4. Ürün zenginleştirme düzeneği görüntüsü

Gerçekleştirilen öncül çalışmalarda, ilgili triboelektrostatik ayırıcı deney düzeneği ile, pozitif yüklü dokuma naylon-kestamid (35 kV) ile dokuma naylon-teflon (28 kV) ve negatif yüklü dokuma yün-delrin (Polioksümetilen) (28.6 kV) çiftleri kullanıldığında statik elektrik üretim performansının oldukça yüksek olduğu gözlenmiştir (Dizdar vd., 2018). Kömür zenginleştirilmesine ilişkin deneysel çalışmalar, en yüksek performansı veren pozitif yüklü dokuma naylon-kestamid/teflon çifti bant ve rulo kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

## 1.2. Kömür Numunelerinin Hazırlanması ve Deneysel Çalışmalar

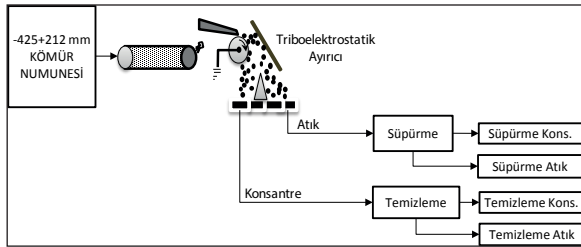
Bu çalışma kapsamında, ülkemizdeki farklı ocaklardan temin edilen kömür numuneleri triboelektrostatik ayırma uygun boyutlarda hazırlanmış ve deneylerde kullanılmıştır. Kömür numuneleri Tunçbilek-1, Tunçbilek-2 (Ömerler lavvarı), Soma-1 ve Soma-2 (Dereköy lavvarı) olmak üzere dört farklı lavvardan temin edilmiştir. Tunçbilek'te halen çalışmakta olan kömür yıkama tesisi beslemesinden alınan yığına konileme dörtleme yöntemi ile temsili alınan numuneler kırılarak  $-425 \mu\text{m}$  tane boyuna indirilmiş ve elenerek  $-425+212 \mu\text{m}$  tane boyu fraksiyonu elde edilmiştir. Benzer şekilde, Soma, Ömerler ve Dereköy kömür yıkama tesisi beslemesinden alınan yığınlar konileme dörtleme yöntemi ile temsili alınan numuneler kırılarak  $-425 \mu\text{m}$  tane boyuna indirilmiş ve elenerek triboelektrostatik ayırma testlerinde kullanılmak üzere  $-425+212 \mu\text{m}$  tane boyu fraksiyonları elde edilmiştir.

Tunçbilek kömürleri (Tunçbilek-1 ve Tunçbilek-2), düşük nem oranına sahip, parlak ve sert linyit türündedir. Linyitle taşkömürü arasında sınıflandırılan bu kömürler taşıma ve depolama esnasında çok az oranda tozlaşır ve ısı değeri yüksektir (Tunçbilek, 2020). Soma kömürleri ise (Soma-1 ve Soma-2) nispeten daha yüksek nemli, yüksek kül içeriğine ve daha düşük ısı değere sahiptirler. Düşük kömür tozlaşması sebebiyle Tunçbilek kömürleri ince boyda daha az kömür kaybına uğrarken, Soma kömürlerinin ince boyları yüksek karbon içeriğine sahip olmaktadır. Triboelektrostatik ayırma ince boylarda düşük verimli bir yöntem özelliği göstermektedir. Buna ek olarak tozlaşma kaynaklı ayırma verimi farklılıklarının önüne geçmek amacıyla deneysel çalışmalarda  $-212 \mu\text{m}$  tane boyundaki numuneler kullanılmamıştır. Bununla birlikte tane boyunun ayırma etkisi üzerine yazarların çalışmaları devam etmektedir.

Triboelektrostatik kaba ayırma testlerinde kullanılan ekipman parametreleri Çizelge 3'te detaylı olarak verilmiştir. Yüksek voltajlı ayırmalarda 5 cm'den düşük elektrot-tambur mesafesinde yük boşalmaları meydana gelebilmektedir. Bu sebeple konsantrenin temizlenmesi aşmasında tüm koşullar sabit tutulmuş ve düşük kapasite ile besleme sağlanmıştır. Süpürme aşamalarında ise elektrot-tambur mesafesi yine 5 cm olarak tutulurken, ayırıcı bıçak konumu 7,5 cm olarak değiştirilmiştir. Testlerde, Şekil 5'te verilen ayırma akım şemasının farklı versiyonları kullanılmıştır. Testlerde konsantrenin veya atığın bir adım daha temizlenmesine karar verilirken ürünlerin miktar ve görünümleri dikkate alınmıştır. Her triboelektrostatik ayırma testi 5 tekrarlı gerçekleştirilmiş, ürünler birleştirilerek gerekiyorsa sonraki temizleme/süpürme adımlarına geçilmiştir. Tekrarlı testlerde belirgin bir ağırlık farkı gözlemlenmemiştir. Triboelektrostatik ayırma uygulamada çok yüksek sayıda temizleme kademeleri gerektirebilen bir yöntemdir (Chen ve Honaker, 2015). Nihai ürünün saflık derecesinin önemli olduğu ve çok yüksek sayıda temizleme adımlarının gerçekleştirildiği uygulamalarda, düşük kapasite ve verim değerleri bir sorun olabilmektedir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında ayırmanın uygunluğu, 2 kademeli ayırma ile elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Triboelektrostatik testler esnasında sabit tutulan koşullar

Sabit Koşullar	
Tambur hızı (devir/dk)	54
Rulo dönüş hızı (devir/dk)	2170
Elektrot türü	Alüminyum
Elektrot tambur arası mesafe (cm)	5
Ayırıcı bıçak konumu (cm)	10
Fırça ile rulo arası mesafe (cm)	2
Besleme öncesi karıştırma süresi (dk.)	2
Rulo cinsi	3 teflon ve 2 kestamid(sürücü)
Bant cinsi	Naylon bant

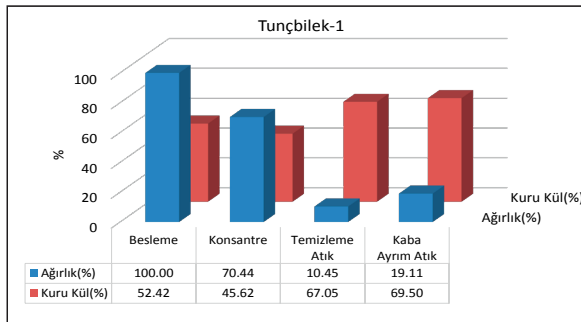


Şekil 5. Ayrımlarda kullanılan genel akım şeması

## 2. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 2.1. Tunçbilek-1 Lavvarı Tüvenan Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Tunçbilek kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve bir atık elde edilmiştir. Birinci kademe ayırım konsantresi temizleme aşamasına tabi tutularak nihai bir temizleme konsantresi ve temizleme atığı elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir.



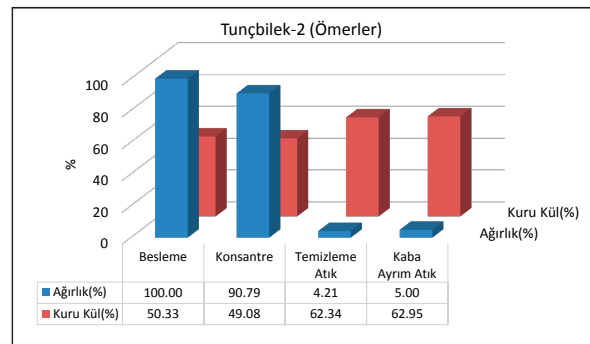
Şekil 6. Tunçbilek-1 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Linyitin elektriksel direnci 9-200 ohm-metre ( $\Omega.m$ ) arasında değerlendirilmektedir. Kömürün içerisinde bulunan ve uzaklaştırılmak istenen külün ise elektriksel direnci  $10^9 - 10^{13}$  ohm-cm ( $\Omega.cm$ ) arasında değişmektedir (Telford vd., 1990). Bu değerler bir malzemenin elektrik iletimine verdiği tepkiyi açıklamaktadır. Bu özellik malzemelerin iletken, yarı iletken veya yalıtkan olmalarına sebep olan özelliktir. Tunçbilek-1 kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriğinin elektrot tarafından çekilerek bir ayrıma olanak sağladığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %52,42'lük kül oranı %45,62'ye düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %69,50'ye çıkarken temizleme aşaması atığı %67.05 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %38,70 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Tunçbilek kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin triboelektrikleme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir.

### 2.2. Tunçbilek-2 Lavvarı Tüvenan Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Tunçbilek bölgesi Ömerler lavvarından elde edilen kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve bir atık elde edilmiştir. Miktarı nispeten fazla olan birinci kademe ayırım konsantresi temizleme aşamasına tabi tutularak nihai bir temizleme konsantresi ve temizleme atığı elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. Tunçbilek-2 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

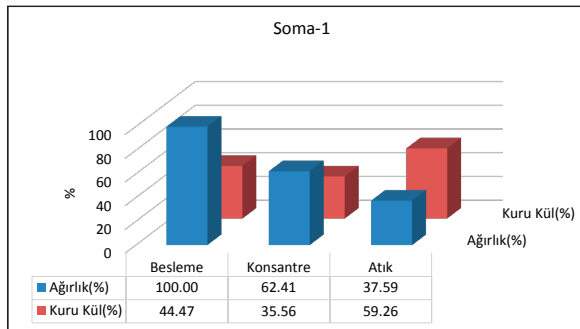


Benzer şekilde Ömerler kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda da düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği beklendiği gibi elektrot tarafından çekildiği gözlemlenmiştir.

Böylece yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %50,33'lük kül oranı %49,08'e düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %62,95'e çıkarken temizleme aşaması atığı %62,34 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %11,47 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Ömerler kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir. İstenilen ürün özelliklerine göre temizleme ve süpürme aşamaları eklenebilmesi mümkündür.

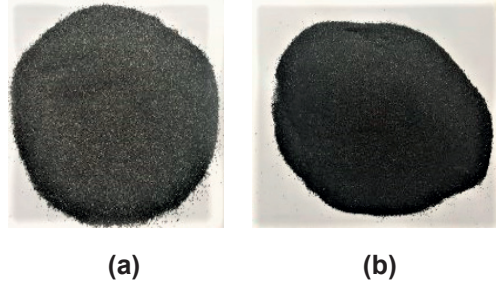
### 2.3. Soma-1 Lavvarı Kömür Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Soma-1 kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve atık elde edilmiştir. Ürünlerin görselleri ve benzer ağırlıktaki miktarlarından yola çıkarak ayırım burada sonlandırılmıştır. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Ek olarak Şekil 9'da tekrarlı testlere örnek teşkil etmesi açısından bu kömürün ayırım ürünlerinden bir setin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 8. Soma-1 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

Dereköy kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği öngörüldüğü gibi elektrot tarafından belli oranda çekildiği gözlemlenmiştir.



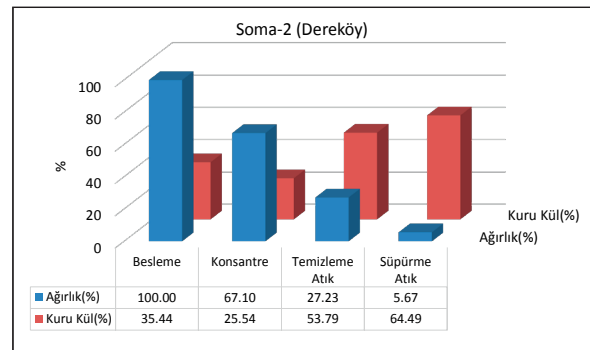
Şekil 9. Soma-1 kömür numunesi ayırım sonrası görüntüsüne ilişkin bir örnek (a: atık, b: konsantre)

Soma kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip, yani iletken olan kül içeriği beklendiği gibi elektrot tarafından çekildiği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan çalışma ile besleme numunesindeki %44,47'lik kül oranı %35,56'ya düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %59,26'ya çıkmıştır. Alınan atıkta, beslemedeki kül %50,10 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür.

### 2.4. Soma-2 Lavvarı Kömür Numunesi ile Yapılan Testlerin Sonuçları

Soma bölgesi Dereköy lavvarından elde edilen kömür numunesi ile yapılan testlerde birinci kademe ayırmadan bir konsantre ve atık bir elde edilmiştir. Ürünlerin görselleri ve miktarlarından yola çıkarak hem birinci kademe ayırım konsantresi hem de birinci kademe ayırım atığı temizleme aşamalarına tabi tutularak temizleme konsantre ve atıkları elde edilmiştir. Ayırım ürünlerine ilişkin sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Soma-2 numunesi triboelektrostatik ayırım sonuçları

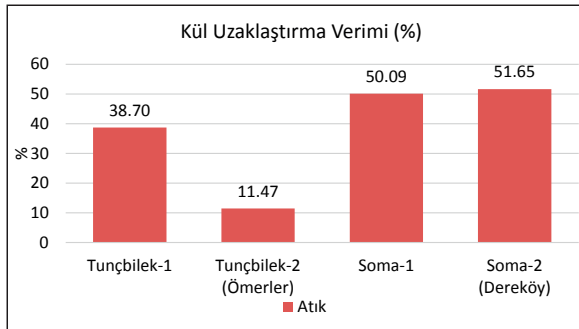


Dereköy kömür numunesine yapılmış olan ayırım testinin sonucunda düşük elektriksel dirence sahip yani iletken olan kül içeriği öngörüldüğü gibi elektrot tarafından belli oranda çekildiği gözlemlenmiştir.

Ayırım sonucunda besleme numunesindeki %35,44'lük kül oranı %25,54'e düşürülmüştür. Kaba ayırım atığında ise kül oranı %64,49'a çıkarken temizleme aşaması atığı %53,79 kül oranına sahiptir. Alınan toplam atıkta, beslemedeki kül %51,64 verim ile uzaklaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışma Dereköy kömür hazırlama tesisinde kullanılan kömür numunesinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini göstermiştir.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tunçbilek yöresine ait kömürlerin linyitle taşkömürü arasında sınıflandırıldığı bilinmektedir. Tunçbilek kömürünün nem oranı düşüktür ve ince boylarda tozlaşma daha az görülür. Soma bölgesi ise nispeten daha yüksek küllü kömürlere ev sahipliği yapmaktadır. Bu kapsamda Şekil 11'de Soma kömürlerinden kül uzaklaştırma veriminin nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Şekil 6'daki önerilere göre gözden geçirilmeli

Farklı kömür numuneleri üzerinde yapılan bu zenginleştirme çalışmaları, farklı kül içeriğine sahip kömür numunelerinin sürtünme ile üretilen statik yük kullanılarak zenginleştirilebileceğini ve içeriklerindeki kül oranlarının bu sayede düşürülebileceğini göstermiştir. Sonuçlar triboelektrostatik ayırmanın ince boyda kömür zenginleştirmede kullanılabilir alternatif bir kuru yöntem olduğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında değerlendirilen triboelektrostatik

ayırım ürünleri, iki kademe ayırım sonucunda elde edilmiştir. Ayırım kademelerinin artırılması ile ürün kalitesinin artması da ayrıca mümkün olacaktır. Bununla birlikte bu metodun uygulandığı tane boylarında yaş yöntemlere göre ekonomik olarak kıyaslaması da ileride yapılacak çalışmalarda incelenebilecektir.

## TEŞEKKÜR

TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) araştırmaya finansal destek sağlamış ve bu makalenin yazılmasını teşvik etmiştir (Proje No: 1001-111M729). Finansal desteklerinden ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

Alfano, G., Carbini, P., Carta, M., Ciccu, R., Del Fa, C., Peretti, R., Zucca, A., 1985. Applications of Static Electricity in Coal and Ore Beneficiation. J. Electrostat., 16, 315–328.

Allen R. C., 2000. Triboelectric Generation: Getting Charged Reproduced with Permission, EE-Evaluation Engineering, 1-6.

Baltrus J. P., Diehl J. R., Soong Y., Sands W., 2002. Triboelectrostatic Separation of Fly Ash and Charge Reversal. Fuel, 81, 757-762.

Ban H., Li T. X., Hower J. C., Schaefer J. L., Stencel J. M., 1997. Dry Triboelectrostatic Beneficiation of Fly Ash. Fuel, 76 (8), 801-805.

Bittner J. D., Hrach F. J., Gasiorowska S. A., Canellopoulos L. A., Guicherd H., 2014. Triboelectric Belt Separator for Beneficiation of Fine Minerals. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry Procedia Engineering, 83, 122-129.

Cangialosi F., Notarnicola M., Liberti L., Stencel J. M., 2008. The Effects of Particle Concentration and Charge Exchange on Fly Ash Beneficiation with Pneumatic Triboelectrostatic Separation. Separation and Purification Technology, 62, 240-248.

Çelik M. S., Yaşar E., 1995. Effect of Temperature and Impurities on Electrostatic Separation of Boron Minerals. Mineral Engineering, Technical Note, 8 (7), 829-833.

- Chen J., Honaker R., 2015. Dry Separation on Coal–Silica Mixture Using Rotary Triboelectrostatic Separator. *Fuel Processing Technology*, 131, 317-324.
- Das S., Samuila A., Dragan C., Dascalescu L., 2009. Behaviour of Charged Insulating Particles in Contact with a Rotating Roll Electrode. *Journal of Electrostatics*, 67, 189–192.
- Diaza A. F., Felix-Navarro R. M., 2004. A Semi-Quantitative Tribo-Electric Series for Polymeric Materials: The Influence of Chemical Structure and properties, *Journal of Electrostatics*, 62, 277-290.
- Dizdar T. O., Kocausta G., Gülcan E., Gülsoy Ö. Y., 2018. A New Method to Produce High Voltage Static Electric Load for Electrostatic Separation–Triboelectric Charging. *Powder Technology*, 327, 89-95.
- Dwari R. K., Hanumantha Rao K., 2006. Tribo-electrostatic Behaviour of High Ash Non-Coking, Indian Thermal Coal. *Int. J. Miner. Process*, 81, 93–104.
- Dwari R. K., Hanumantha Rao K., Somasundaran P., 2009. Characterisation of Particle Tribo-Charging and Electron Transfer with Reference to Electrostatic Dry Coal Cleaning. *Int. J. Miner. Process*, 91, 100-110.
- Dwari R. K., Mohanta S. K., Rout B., Soni R. K., Reddy P. S. R., Mishra B. K., 2015. Studies on the Effect of Electrode Plate Position and Feed Temperature on the Tribo-Electrostatic Separation of High Ash Indian Coking Coal. *Advanced Powder Technology*, 26, 31-41.
- Finseth, D., Newby, T., Elstrodt, R., 1993. Dry Electrostatic Separation of Fine Coal. In: Parekh, V.B.K., Gropps, J.G. (Eds.), *Processing and Utilization of High-Sulfur Coals*. Elsevier Science Publisher, B.V., Amsterdam, 91-98.
- Hangsubcharoen M., 1999(a). Thesis. A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Blacksburg, Virginia Tech., 193-224.
- Hangsubcharoen M., 1999(b). Thesis. A Study of Triboelectrification Mechanisms for Coal, Quartz and Pyrite. Blacksburg, Virginia Tech., 1-25.
- Higashiyama Y., Asano K., 1998. Recent Progress in Electrostatic Separation Technology, *Particulate Science and Technology*, 16:1, 77-90.
- Iuga A., Cuglesan I., Samuila A., Blajan M., Vadan D., Ascalescu L., 2001. Electrostatic Separation of Muscovite Mica from Feldspathic Pegmatites, 0-7803-7116-X/01 (C) IEEE, 2249- 2255.
- Iuga A., Samuila A., Morar R., Bilici M., Dascalescu L., 2016. Tribocharging Techniques for the Electrostatic Separation of Granular Plastics from Waste Electric and Electronic Equipment. *Particulate Science and Technology*, 34 (1), 45-54.
- Kelly E.G., Spottiswood D.J., 1982. *Introduction to Mineral Processing*. Wiley-Interscience Publication, 291-300.
- Li T. X., Ban H., Hower J. C., Stencil J. M., Saito K., 1999. Dry Triboelectrostatic Separation of Mineral Particles: A Potential Application in Space Exploration. *Journal of Electrostatics*, 47, 133-142.
- Mirkowska M., Kratzer M., Teichert C., Flachberger H., 2014. Atomic Force Microscopy as a Tool to Explore Triboelectrostatic Phenomena in Mineral Processing. *Chem. Ing. Tech.*, 86 (6), 857-864.
- Mular A. L., Halbe D. N., Barratt D. J., 2002. *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control*. Editörler: Mular A. L. Vancouver: SME, Halbe D. Salt Lake City: SME, Barratt D.J. North Vancouver: SME. p.168.
- Panat R., Wang J, Parks E., 2014. Effects of Triboelectrostatic Charging Between Polymer Surfaces in Manufacturing and Test of Integrated Circuit Packages, *IEEE Transactions on Components, Packaging And Manufacturing Technology*, 4 (5), 943-946.
- Park C. H., Park J. K., Jeon H. S., Chul Chun B., 2008. Triboelectric Series and Charging Properties of Plastics Using the Designed Vertical-Reciprocation Charger. *Journal of Electrostatics*, 66, 578-583.
- Richard G., Touhami S., Zegloul T., Dascalescu L., 2016. Optimization of Metals and Plastics Recovery from Electric Cable Wastes Using a Plate-Type Electrostatic Separator. *Waste Management*. 60:112-122.
- Saeki M., 2010. Triboelectric Separation of Binary Plastic Mixture. *World Academy of Science. Engineering and Technology*, 4, 818-821.
- Soong Y., Schoffstall M. R., Link T.A., 2001. Triboelectrostatic Beneficiation of Ash. *Fuel*, 80, 879-884.
- Tao D., AL-hwaiti M., 2010. Beneficiation Study of Eshidiya Phosphorites Using A Rotary Triboelectrostatic Separator. *Mining Science and Technology*, 20, 0357–0364.

- Tao D., Fan M., Jiang X., 2009. Dry Coal Fly Ash Cleaning Using Rotary Triboelectrostatic Separator. *Mining Science and Technology*, 19, 0642–0647.
- Tao D., Sobhy A., Li Q., Honaker R., Zhao Y., 2011. Dry Cleaning of Pulverized Coal Using A Novel Rotary Triboelectrostatic Separator (RTS). *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 31, 187-202.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., 1990. Electrical Properties of Rocks and Minerals. In *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press., pp. 283-292.
- Tilmatine A., Medles K., Bendimerad S.E., Boukholda F., Dascalescu L., 2009. Electrostatic Separators of Particles: Application to Plastic/Metal, Metal/Metal and Plastic/Plastic Mixtures. *Waste Management*, 29, 228–232.
- Tripathy S. K., Ramamurthy Y., Kumar C. R., 2010. Modeling of High-Tension Roll Separator for Separation of Titanium Bearing Minerals. *Powder Technology*, 201, 181–186.
- Tunçbilek Belediyesi. <http://www.tuncbilek.bel.tr/sayfa.php?id=52>. (Son erişim: 2020)
- Wang H., Chen S., Cai B., Ge L., Chen Q., 2014. Study on the Dynamics of Tribocharged Coal and Mineral Particles in Free-Fall Triboelectric Separator. *Separation Science and Technology*, 49, 2990–2998.
- Wei J., Realff M. J., 2005. Design and Optimization of Drum-type Electrostatic Separators for Plastics Recycling. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 3503-3509.
- Wills B. A., Napier-Munn T., 2006. *Mineral Processing Technology an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Editörler: Wills, B. A., Napier-Munn T. Elsevier Science & Technology Books, 365-372.
- Wu G., Li J., Xu Z., 2013. Triboelectrostatic Separation for Granular Plastic Waste Recycling: A Review. *Waste Management*, 33, 585–597.
- Xin-xi Z., Dai-yong D., Bing T., Jin-song W., Feng D., Hai-sheng L., Rui-xin M., 2009. Research on the Triboelectrostatic Separation of Minerals from Coal. The 6th International Conference on Mining Science&Technology *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, 845–850.
- Younes M., Younes A. Sayah H., Tilmatine A., Samuila A., Dascalescu L., 2013. Numerical and Experimental Study of Insulating Particles Behavior in Roll-Type Corona-Electrostatic Separators. *Particulate Science and Technology*, 31, 71–80.
- Zeghloul T., Touhami S., Richard G, Miloudi M, Dahou O., Dascalescu L., 2016. Optimal Operation of a Plate-Type Corona-Electrostatic Separator for the Recovery of Metals and Plastics from Granular Wastes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (3).
- Zhang L., Hou J., Bi X. T., Grace J. R., Janke T., 2012. Electrostatic Beneficiation of Fly Ash in A Free-Falling System. *Claudio Arato Particuology*, 10, 154-160.



Orijinal Araştırma / Original Research

## ATIK ELEK ALTI POMZA MALZEMESİNİN KİLLİ ZEMİN ORTAMLARINDA MÜHENDİSLİK KARAKTERİSTİKLERİ BAKIMINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

AN EVALUATION OF WASTE UNDERSIZE PUMICE MATERIALS IN TERMS OF ENGINEERING CHARACTERISTICS IN CLAYEY SOILS

Murat Kalkan<sup>a,\*</sup>, Can Erenson<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Aksaray Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Aksaray, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 07 Şubat / February 2020

**Kabul Tarihi / Accepted** : 21 Temmuz / July 2020

### ÖZ

#### Keywords:

Atık pomza,  
Kil,  
Koni batma deneyi,  
Modifiye proktor deneyi.

Gelişen ülkeler veya şehirlerde artan nüfus ve yapılaşma ile birlikte inşaat sektörünün temel yapı taşı durumunda olan agregaya ihtiyaç artmaktadır. Yapıların ihtiyacını karşılamak amacı ile yerleşim yerlerine yakın taş ocakları açılmakta ve ocaklardan elde edilen malzemeler her ne kadar inşaat sektöründe büyük oranda kullanılabilse de; arta kalan ince taneli malzeme atık olarak beklemektedir. Bu çalışmada, Aksaray ili çevresinde yer alan pomza taş ocağından atık olarak elde edilen ürünlerin, Avanos (Nevşehir) yöresi killeri ile çeşitli oranlarda karıştırılarak zemin özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Kil numunesinin, ince taneli atık pomza malzemesi ile belirli oranlarda karışımından yapılan koni batma likit limit deneyi ve modifiye proktor deneyi sonucunda kil numunesi içerisindeki atık pomza miktarı arttıkça likit limit değeri ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmakta, optimum su içeriği artmaktadır.

### ABSTRACT

#### Anahtar Sözcükler:

Waste pumice,  
Clay,  
Fall cone method,  
Modified proctor test.

Population growth in developing countries and cities increases structuring and it increases the need for aggregate which is the basic building block of the construction industry. For this reason, quarries close to the settlements are opened and materials obtained from the quarries are mostly used in the construction sector but the remaining fine grained materials are considered as waste. In this study, the products obtained from pumice quarry located in Aksaray province and clayey soil in Avanos (Nevşehir) region were mixed in various quantities and soil properties of this mixture were investigated. As a result of fall cone method tests and modified proctor tests on these mixtures, waste fine graded pumice content in the clay samples increase, the liquid limit values and the maximum weight per unit of volume values decrease and the optimum water content values increase.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author: [mkalkan@aksaray.edu.tr](mailto:mkalkan@aksaray.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-4350-1599>

\*\* [canerenson@aksaray.edu.tr](mailto:canerenson@aksaray.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-6616-6180>

## GİRİŞ

Gün geçtikçe artan nüfus ile birlikte insanların barınma, ulaşım, enerji ve pek çok alanda daha gereksinimleri artmaktadır. Bu doğrultuda büyük ölçekli yapılar, ulaştırma elemanları, barajlar, fabrikalar ile bu ve benzeri yapıların duraylılığını korumaya yönelik inşaat sektörü giderek genişlemektedir. Tüm bu yapıların ihtiyacını karşılamak için ise yerleşim yerlerine yakın taş ocakları açılmaktadır. Ocaklardan elde edilen malzemeler her ne kadar inşaat sektöründe büyük oranda kullanılabilse de; üretilen malzemenin tamamı değerlendirilmemektedir. Arta kalan malzemeler depolarda stok fazlası olarak beklemektedir. Konkasör artığı ince taneli malzemeler rüzgâr etkisiyle çevreye dağılmaktadır. Bunun sonucunda çevre sakinleri toz içerisinde kalmakta, bitkilerin ve balıkların yaşamı engellenmekte ve su kaynakları kirlenmektedir.

Bu nedenle, Maden ve Taşocakları İşletmelerinde Tünel ve Tünel Yapımında Tozla Mücadeleye ilişkin Yönetmelikte belirtilen genel hükümler büyük önem taşımaktadır (TMMOB, 1990). 20635 sayılı Resmi Gazete’de, ocakta çalışan işçilerde ve çevre sakinlerinde pnömokonyoz (akciğerde toz birikmesi ve bunun sonucunda oluşan doku tepkimesi) hastalığının önüne geçilmesi hedeflenerek bu yönetmelikte toz kontrolü uygulamalarının önemine dikkat çekilmiştir. Atık halde bulunan ve kullanılmayan toz yığınlarının bertaraf edilmesi de bu önlemler arasında yer almaktadır. Pnömokonyozun çalışma alanlarından kaynaklı toza bağlı olarak ortaya çıkma nedenleri, teşhisi, insan sağlığına etkisi ve zararları, endikasyonları, önlenmesi vb. gibi pek çok konunun ele alındığı çok sayıda makale literatürde yerini almaktadır (Köksal ve Kayhan, 2019; Sarı ve Piyal, 2019, Lee vd., 2018; Moitra vd., 2018; Rushton, 2017; Na vd., 2017, Bozkurt vd., 2016; Ergün vd., 2016).

Endüstriyel hammadde olarak birçok sektörde pomza kullanım amacına göre ya ana hammadde ya da katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Pomza taşının kullanılacağı sektöre göre kırma, eleme ve boyutlandırılması ile elde edilen agregalar kullanım amacına göre uygun boyutlarda değerlendirilmektedir. Ancak boyutlandırma işlemi sırasında elek altında kalan

ince taneli malzeme depolarda stok fazlası olarak beklemektedir.

Aksaray ili çevresinde yer alan pomza taş ocağı yetkilileri, üretim faaliyetleri haricinde atık olarak elde ettikleri ürünleri değerlendirmek üzere yeni kullanım alanları arayışındadırlar. Bu bakımdan, pomza ocaklarında ortaya çıkan bu ürün artıkları depolarında uzun süre beklemektedir ve söz konusu çevre kirliliklerine yol açmaktadır.

Ayrıca, Aksaray’ın belirli bölgeleri ile Avanos (Nevşehir) çevresinde oldukça sık rastlanılan killi zemin ortamlarına rastlanılmaktadır. Çalışmada, bu iki farklı malzeme türünün bölgede çokça miktarda bulunmasından dolayı ve her iki malzemenin de kendine özgü karakteristiklerinin değerlendirilmeye müsait olması üzerine değişken oranlarda karıştırılıp davranışının incelenmesi amaçlanmıştır.

Pomza ve kil malzemelerinin bir arada kullanıldığı pek çok araştırma literatürde yer almaktadır. Bu kapsamda Çimen (2006), pomzanın yüksek plastisiteli kilin stabilizasyonu için uygun bir katkı maddesi olduğunu belirtmiştir. Diğer bir yandan Çimen vd. (2010), kile belirli oranlarda ilave edilen pomza tozu ve mermer tozunun kilin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesinde bu atık malzemelerin kullanılabilirliğini vurgulamıştır. Yine ince taneli zemin numunesinin iyileştirilmesinde pomza tozu ve mermer tozu kullanılarak hazırlanan killi karışımlarda, mermer tozunun serbest basınç mukavemetini %25 düşürdüğü pomza tozunun ise %123 yükselttiği belirlenmiştir (Keskin vd., 2017). Isparta, Manisa Kula ve Bitlis gibi farklı bölgelerde çıkarılan pomza malzemesinin yüksek plastisiteli killer içerisindeki etkinliklerinin incelendiği başka bir çalışmada ise pomza – kil ikili ve pomza – kil – kireç üçlü karışımları araştırılarak ideal oranlar belirlenmiştir (Çimen vd., 2020).

Bu çalışma amacı ile atık pomza malzemesi ve killi malzemenin ana oksit ve iz element jeokimyasal özellikleri Aksaray Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde (ASÜBTAM) dalga boyu dağılımlı X ışını floresans spektrometresi (WD-XRF) cihazında belirlenmiştir. Deneyde kullanılacak malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemeye yönelik çalışmalar Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Uygulamalı Jeoloji Laboratuvarında yapılmıştır.



## 1. DENEYLERDE KULLANILAN ATIK POMZA VE KİL MALZEMELERİNİN ÖZELLİKLERİ

### 1.1. Atık Pomza Malzemesi

Aksaray yöresindeki pomza ocağında atık halde bulunan ince taneli pomza malzemesinin jeolojik petrografik, jeokimyasal ve fiziksel özellikleri bu bölümde ele alınacaktır.

Pomza (ponza) terimi İtalyanca bir sözcüktür. Dilimizde ise süngertaşı, köpüktaşı, nasırtası, hışırtaşı, küvek, kisir gibi pek çok adla anılmaktadır. Asidik ve bazik volkanik faaliyetler neticesinde iki tür pomza oluşumu mevcuttur: Bunlar asidik pomza ve bazik pomzadır. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ve kullanılan asidik pomza, beyaz kirli görünümde ve grimsi beyaz renktedir. Asidik karakterli pomzalarda silis oranı daha yüksek olup, inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir (MTA, 2019).

Pomza, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, boşluklu, süngerimsi, fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı dayanıklı, gözenekli, camsı volkanik bir kayadır. Oluşumu sırasında bünyedeki gazların ani olarak bünyeyi terk etmesi ve ani soğuması nedeniyle, makro ölçekten mikro ölçüğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler arası genelde bağlantısız boşluklu olduğundan, geçirgenliği düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Sertliği mohs skalasına göre 5-6'dır.

Orta Anadolu'da Orta Miyosen'den itibaren çok geniş alanlarda şiddetli volkanik olaylar olmuştur. Özellikle Aksaray ve Niğde arasında bulunan Hasandağı - Melendizdağı volkanizması sonucu çok sayıda volkan konilerinin, kraterin, tuf örtülerinin ve lav akıntılarının yer aldığı yaklaşık 100 km<sup>2</sup>lik alanı kapsayan volkanik aktivite; Orta Miyosenden başlayıp Kuvaterner sonuna kadar etkin olmuştur (Ercan, 1985). Aksaray bölgesinde bulunan pomza oluşumları, Hasandağı volkanizmasının patlaması sonucunda gelişen ürünlerdir. Volkanizmanın ürünleri Kuvaterner yaşlı Hasandağ volkanitleri olarak adlandırılmış ve birim farklı evrelerde oluşmuş kül-blok akmaları, döküntü ve akma tüfleri ile andezitik, bazaltik ve riyolitik lavlardan oluşmaktadır (Dönmez vd., 2005). Pomzalar makroskobik olarak açık

gri, yer yer krem renkli özellik göstermektedir. Atmosfer koşullarında ani basınç azalması sonucu genişleyen gazlardan geriye kalan boşlukların meydana getirdiği veziküler dokuya sahiptir. Ayrıca kayaç içerisinde ana mineralojik bileşim olarak saçılmış şekilde polisentetik ikizlenme gösteren iri plajiyoklas mineralleri, biyotit mineralleri, aksesuar olarak pirit minerali gözlenmektedir (Başpınar ve Gündüz, 2006).

Pomza ocağında arta kalan ince taneli malzemenin ana element oksit ve iz element jeokimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmektedir.

Atık pomza malzemesinin ana element oksit ve iz element jeokimyasal analiz sonuçlarına dayanılarak hazırlanan jeokimyasal adlama diyagramında (Cox vd., 1979) pomzanın riyolitik magma sonucu oluştuğunu göstermektedir (Şekil 1). AFM (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) diyagramında pomzanın (Irvine ve Baragar, 1971) magma köken sınıflamasına göre kalkalkalin karaktere sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2).

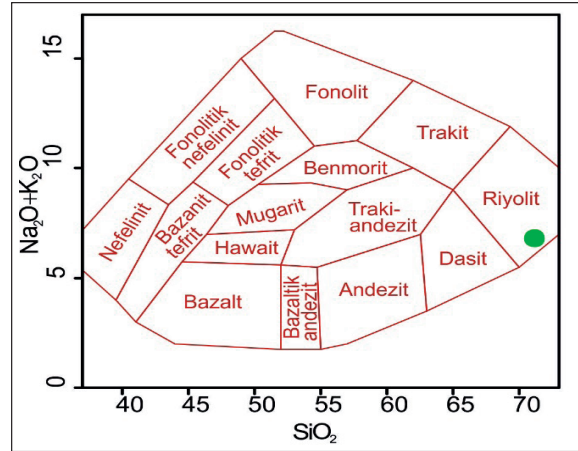
Çizelge 1. Atık pomza malzemesinin jeokimyası

Ana Oksit Element	(%)
SiO <sub>2</sub>	71,359
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,668
K <sub>2</sub> O	4,955
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,420
Na <sub>2</sub> O	1,730
CaO	1,242
MgO	1,064
TiO <sub>2</sub>	0,273
MnO	0,074
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,042
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,001
Ateşte Kayıp	3,7
Toplam	99,53

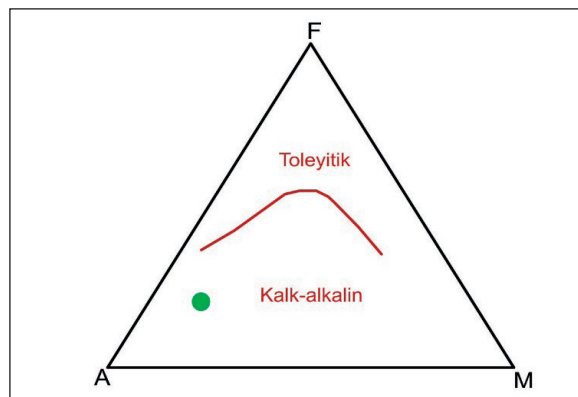
İz Element	(ppm)
Cl	1251,68
Sc	14,98
Co	4,77
Ni	13,83
Cu	12,94
Zn	38,86
Ga	16,8
Ge	0,81
As	8,38
Rb	174,67
Sr	172,67
Y	12,54
Zr	141,43
Nb	13,17
Ba	735,36
Nd	27,31
Sm	3,82
Gd	5,93
Hf	5,11
Pb	54,57
Th	31,33
U	6,25

Atık pomza malzemesinin fiziksel özelliklerini belirlemek amacı ile özgül yoğunluk ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonuçlarına göre granülometri eğrisi çizilmiştir (Şekil 3).

Yapılan deneyler sonucu atık pomza malzemesinden elde edilen fiziksel özellikler Çizelge 2’de verilmiştir.



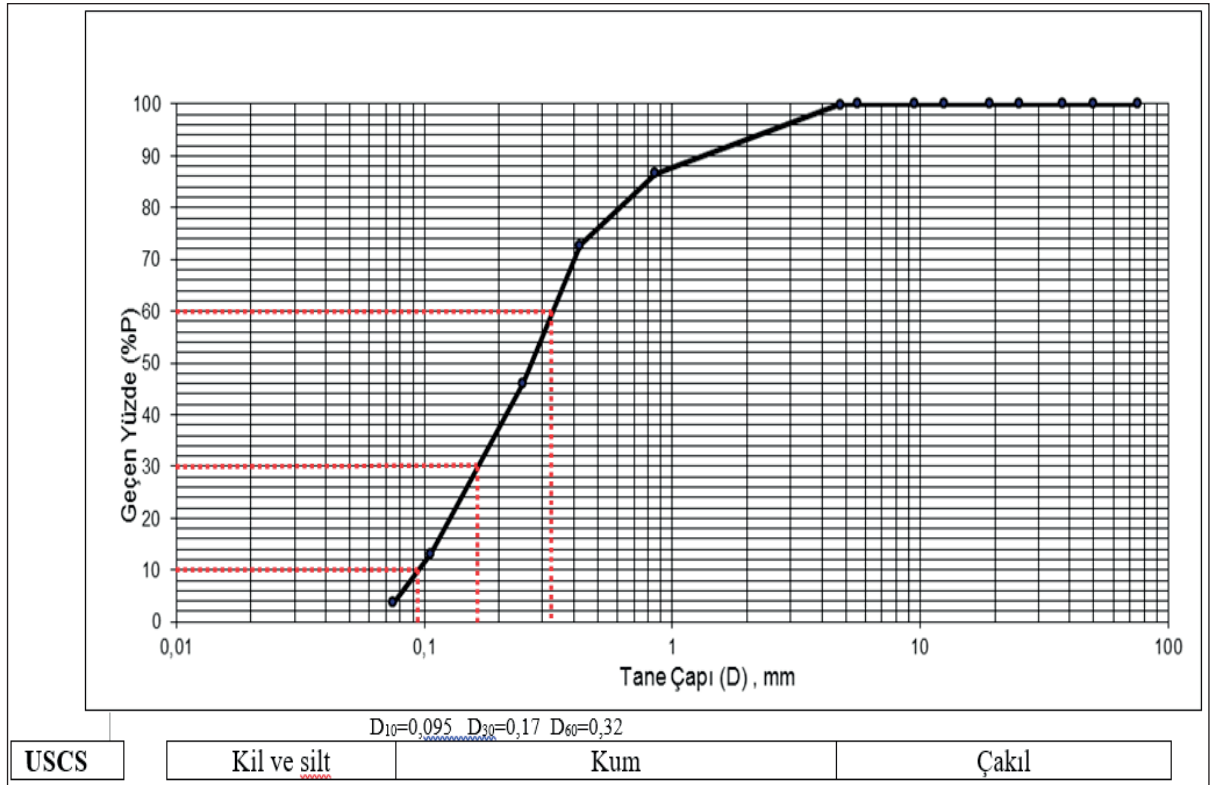
Şekil 1. SiO<sub>2</sub> ve Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O içeriğine göre pomza oluşumlarının sınıflaması (Cox vd., 1979)



Şekil 2. AFM içeriğine göre magma köken sınıflaması (Irvine ve Baragar, 1971)

Çizelge 2. Atık pomza malzemesinin fiziksel özellikleri

Parametre	Değer
Renk	Açık gri
Özgül Ağırlık	2,33
Çakıl içeriği (%)	0
Kum içeriği (%)	96,4
Kil ve silt içeriği (%)	3,6
Efektif Çap (mm)	0,095
Uniformluk Katsayısı (Cu)	3,37
Eğrilik Katsayısı (Cr)	0,95
Zemin Sınıfı (USCS)	SP
Plastik Limit	NP



Şekil 3. Atık pomza malzemesinin granülometrisi

## 1.2. Kil Malzemesi

Nevşehir ili, İç Anadolu Bölgesi Orta Kızılırmak Bölümü'ndedir ve kuzeyinde Gülşehir ile Avanos yer almakta olup doğusunda Ürgüp, güneyinde Derinkuyu ve batısında Acıgöl ilçeleri bulunmaktadır.

Kızılırmak'ın çevresindeki bölgelerden elde edilen Avanos kilini diğer killerden ayıran en önemli hususlar içeriğinde bulunan illit, mika, kuvars, feldspat, kalsit, dolomit ve hematit minerallerinin bulunması ve bünyesindeki hematit mineralinden dolayı kırmızı renkli olmasıdır. Killi zemin içerisinde bulunan hematit oranına göre açık sarı, açık ya da koyu kırmızı renklerinde de bulunabilmektedir. Bu bakımdan deneylerde kullanılan killi malzemenin davranışına etki eden ana oksit elementlerin yüzdece oranı Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Avanos kilinin jeokimyası (Terzi vd., 2018)

Ana Oksit Element	(%)
SiO <sub>2</sub>	38,481
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,098
K <sub>2</sub> O	4,565
Na <sub>2</sub> O	0,371
CaO	5,691
MgO	2,103
TiO <sub>2</sub>	0,425
SO <sub>4</sub>	0,178
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,988
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,105
MnO	0,133
Cl	0,055
Ateş Zayıtı	21,800
Toplam	98,993

Killi malzemenin fiziksel özelliklerini belirlemek amacı ile özgül yoğunluk, elek analizi, likit limit ve plastik limit deneyleri yapılmıştır. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre zemin cinsi belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu kil malzemesinden elde edilen fiziksel özellikler Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Kil malzemesinin fiziksel özellikleri (Erenson vd., 2015)

Parametre	Değer
Renk	Koyu kahverengi
Özgül Ağırlık	2,69
Kum İçeriği(%)	17,33
Silt İçeriği(%)	6,22
Kil İçeriği(%)	76,44
Likit Limit(%)	43,9
Plastik Limit(%)	21,8
Zemin Sınıfı (USCS)	CL

%10, %30, %50 oranında kil numunesine karıştırılan atık pomza malzemesinin likit limit değerleri hesaplanmıştır. %10 oranında atık pomza içeren kil numunesinin 20 mm'lik batmaya karşılık gelen likit limit değeri %48 olarak belirlenmiştir (Şekil 5).

Avanos kilinin mühendislik özellikleri ve jeokimyasal analizi sonucunda zeminin su emme miktarının yüksek ve mineralin hacim değişikliği yapmasına müsait olduğu gözlemlenmektedir. Kilin bu yapısı gereği malzemede plastisite ve mukavemet değişmekte ve kilin şişme ve büzülme faaliyetleri de farklı davranışlara sebebiyet vererek yapısal sorunlara yol açabilmektedir. Bu sebepten dolayı, killi zemin ortamlarının hacimsel büzülme testlerin yapılması büyük önem taşımaktadır.

## 2. LABORATUVAR DENEYLERİ

İnce taneli atık pomza malzemesi %10, %30 ve %50 oranlarında killi zemin ortamlarından alınmış numuneler ile karıştırılarak pomza oranının kilin su içeriğine, likit limitine ve sıkışma karakteristiklerine olan etkisi araştırılmıştır. Bu amaç kapsamında koni batma likit limit ve otomatik modifiye proktor deneyleri yapılmıştır.

### 2.1. Koni Batma Likit Limit Deneyi

İngiltere Devlet Karayolları Kurumu'nun laboratuvarlarında (Transport and Road Research Laboratory, TRRL) 1993 yılında Crowthorne, Berkshire'da geliştirilen bu deney, BS 1377: Part:2 (1990) standardındaki ölçülere belirlenmiş metalik bir koninin kendi ağırlığı altında 5 saniye sürede zemin örneğinin içine batmasından hareketle likit limitin belirlenmesine dayanmaktadır (Head, 1992). Daha sonra bu standarda uygun bir şekilde koni batma cihazının içindeki düzenek vasıtasıyla kilitleme mekanizması açılmaktadır ve otomatik olarak koni serbest bir şekilde kendi ağırlığı ile numunenin içerisine batmaya başlamaktadır. 5 saniye sonra kilitleme mekanizması yine otomatik olarak çalışmakta ve koniyi kilitleyerek bulunduğu noktada sabit kalmasını sağlamaktadır (Foto 1). Bu sürecin akabinde cihaz üzerindeki elektronik ölçme çubuğundan koninin batma miktarı belirlenmiştir. Koninin battığı kısımdan alınan bir miktar örnek etüvde kurutularak belirlenen batmaya karşılık gelen su içeriği bulunmuştur. %0, %10, %30 ve %50 pomza içeriğine sahip numuneler farklı su içeriklerinde her su içeriği için üç farklı noktadan belirlenen koni batma miktarlarının ortalaması alınmış ve dört kez tekrarlanan deneyde 20 mm'lik batmaya karşılık gelen su içeriği örneğin likit limit değeri olarak alınmıştır. Kullanılan deney örneği 0,425 mm elek altı malzeme olmalıdır. Bu deneyin avantajı, likit limitin belirlenmesinde Casagrande yöntemine göre deneyi yapan kişi hatalarını en aza indirmesidir (Orhan vd., 2013).



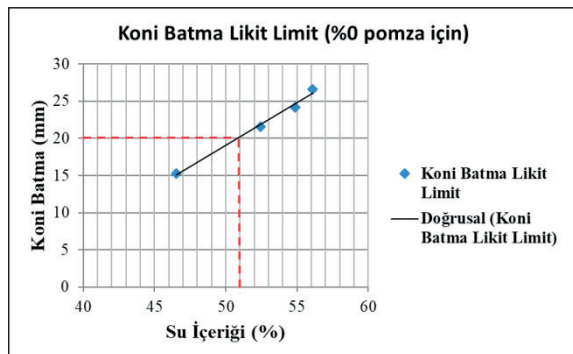
Foto 1. Koni batma likit limit deneyi

Kil numunesinin, ince taneli atık pomza malzemesi ile belirli oranlarda karışımından yapılan karışımın ortalama koni batma değerleri ile bu batmaya karşılık gelen su içerikleri belirlenmiştir (Çizelge 5).

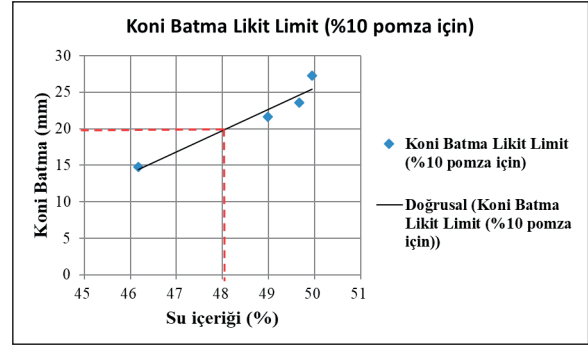
Çizelge 5. Değişik oranlardaki pomza içeriğine sahip kil numunesinin ortalama koni batma miktarı-su içeriği değerleri

Pomza oranı %	Ortalama Koni Batma Miktarı (mm)	Su İçeriği (w) (%)
0	15,24	46,51
	21,54	52,44
	26,62	56,11
	24,21	54,89
10	14,80	46,18
	21,61	48,98
	23,57	49,66
	27,26	49,94
30	16,80	38,40
	17,89	38,87
	23,66	41,49
	26,53	45,54
50	24,27	36,53
	20,80	35,43
	19,50	34,93
	13,17	31,91

Kil numunesinin hiç atık pomza malzemesi karıştırılmamış halinin koni batma likit limit deneyi sonucunda 20 mm'lik batmaya karşılık gelen likit limit değeri %51 bulunmuştur (Şekil 4).

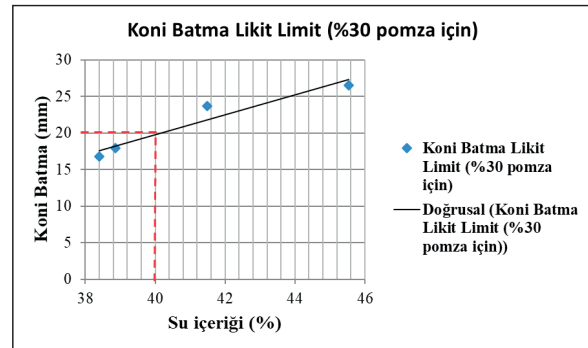


Şekil 4. Kil numunesinin koni batma-su içeriği grafiği



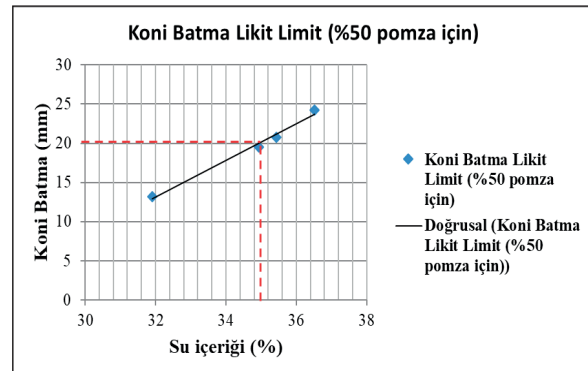
Şekil 5. %10 oranında pomza içeren kil numunesinin koni batma-su içeriği grafiği

%30 oranında atık pomza içeren kil numunesinin 20 mm'lik batmaya karşılık gelen likit limit değeri %40 olarak belirlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. %30 oranında pomza içeren kil numunesinin koni batma-su içeriği grafiği

%50 oranında atık pomza içeren kil numunesinin 20 mm'lik batmaya karşılık gelen likit limit değeri %35 olarak belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. %50 oranında pomza içeren kil numunesinin koni batma-su içeriği grafiği



## 2.2. Proktor Deneyi

Kil numunesinin, ince taneli atık pomza malzemesi ile belirli oranlarda karışımından yapılan karışımın otomatik modifiye proktor deneyleri sonucunda optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir (Foto 2).



Foto 2. Deneyde belirli oranda karıştırılarak kullanılan kil ve atık pomza malzemesi

ASTM D558 (2011), AASHTO T99 (2015), BS 1377-1 (2016) standartlarına uygun ve otomatik modifiye proktor deneyinin başlıca kullanım amacı laboratuvar numunelerinin kompaksiyon işlemlerinde sürekliliğin ve tekrarlana bilirliliğin sağlanmasıdır. Tam otomatik ve kolay kullanımlı olup düzenli kompaksiyon otomatik numaratorlü proktor ve CBR kalıpları ile kullanılmaktadır. Kullanıcı tanımlı girilen vuruş sayısı sonunda numarator otomatik olarak sıfırlanmaktadır. Otomatik kompaktörün döner tablası proktor ve CBR kalıplarının uniform olarak sıkışmasını sağlamakta ve 4,5 kg düşey ağırlık kalıbın iç yüzeyinden ortasına kadar dairesel hareket etmektedir (Foto 3).



Foto 3. Otomatik modifiye proktor deney cihazı

Cihaz üzerinde kullanıcı tanımlı vuruş sayısının ayarlandığı direkt okumalı numarator ve proktor anahtarı bulunmaktadır. Cihaz otomatik olarak kullanıcı tarafından tanımlanan 25 vuruş sayısını tamamladıktan sonra durmaktadır. Çalışmada, numuneler 5'er tabaka halinde sıkıştırılarak hazırlanmıştır.

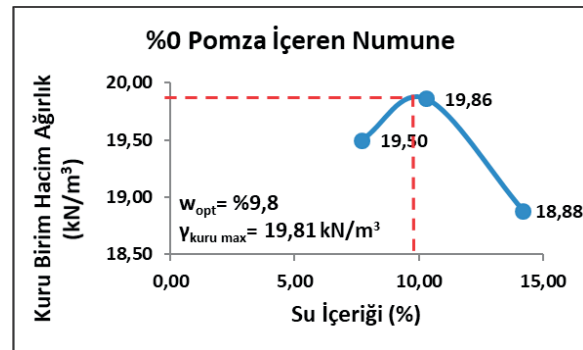
Standart ve modifiye proktor deneyleri arasındaki temel ayrım sıkıştırmanın farklı enerjilerde gerçekleştirilmesidir. Artan enerji ile maksimum kuru birim hacim ağırlık artar ve optimum su içeriği azalır. Böylece kompaksiyon eğrisi, sıfır hava boşluğu eğrisine daha yakın çıkarak daha iyi sonuç vermektedir.

Kil numunesinin hiç atık pomza malzemesi karıştırılmamış halinin otomatik modifiye proktor deneyi yapılmıştır. Elde edilen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlığı değerleri Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. %0 pomza oranı için sonuçlar

Su İçeriği (%w)	Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_{dry}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
7,700	19,50
10,300	19,86
14,200	18,88

Kil numunesinden elde edilen su içeriği ve kuru birim hacim ağırlık değerlerine göre hazırlanan diyagramdan %9,8 optimum su içeriği maksimum 19,81 kN/m<sup>3</sup> kuru birim hacim ağırlık elde edilmiştir (Şekil 8).



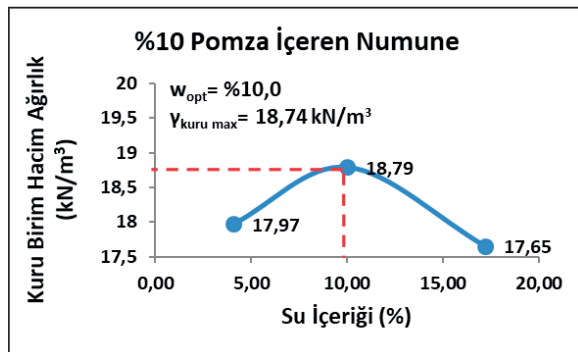
Şekil 8. Kil numunesinin optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlık grafiği

Daha sonra kil numunesi, %10, %30 ve %50 oranında atık pomza malzemesi ile karıştırılarak otomatik modifiye proktor deneyi yapılmıştır. Su içeriği ve kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir (Çizelge 7).

Çizelge 7. Değişik oranlardaki pomza içeriğine sahip kil numunesinin su içeriği- kuru birim hacim ağırlık değerleri

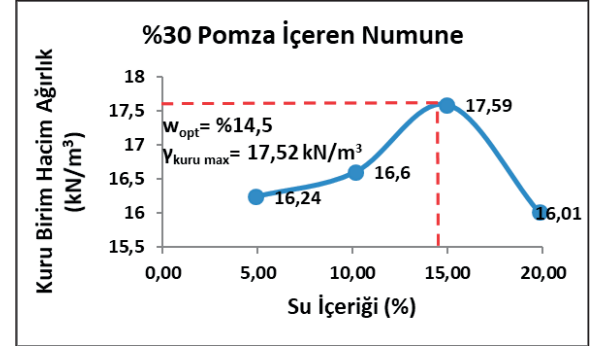
Pomza oranı	Su İçeriği (%w)	Kuru Birim Hacim Ağırlık ( $\gamma_{dry}$ ) ( $\text{kN/m}^3$ )
	4,075	17,97
%10	10,000	18,79
	17,170	17,65
%30	4,887	16,24
	10,134	16,60
	14,947	17,59
	19,813	16,01
%50	4,757	14,81
	10,218	15,23
	15,038	15,99
	18,692	15,63

Değişik oranda kil numunesine karıştırılan atık pomza malzemesinin optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır. %10 oranında atık pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası %10 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $18,74 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir (Şekil 9).



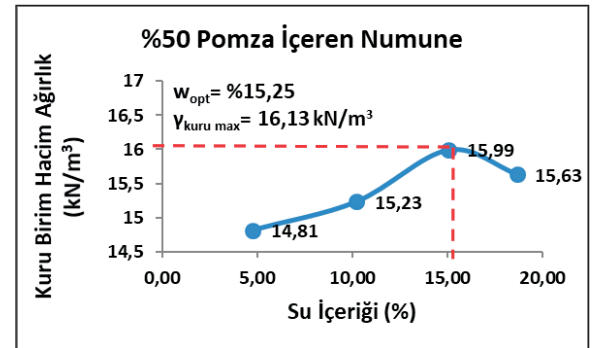
Şekil 9. %10 oranında pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlık grafiği

%30 oranında atık pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası %14,5 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $17,52 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. %30 oranında pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlık grafiği

%50 oranında atık pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası %15,25 ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı  $16,13 \text{ kN/m}^3$  olarak belirlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. %50 oranında pomza içeren kil numunesinin optimum su muhtevası-maksimum kuru birim hacim ağırlık grafiği

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bütün malzemeler yük uygulandığı zaman deformasyona uğramaktadır. Zeminlerde de gerilme altında hacim azalması ile birlikte kayma deformasyonu oluşmadan kompakte oldukları öngörülmektedir. Bununla beraber, zemin kütlesi hacmindeki söz konusu bu düşüş, zemin tanelerinin sıkışması, boşlukların türü, yapısı

ve sürekliliği, boşluklardaki suyun ve havanın uzaklaşma şekli ve süresine bağlı olarak farklı türde davranışlar gözler önüne sermektedir. Bu kapsamda çalışmada, farklı türde malzemelerin bir arada kullanılarak sıkışma ve su muhtevası gibi mühendislik özelliklerinin olumlu yönde iyileştirilmesinin önemi vurgulanmaktadır.

Sıkışma, kum, çakıl vb. granüler ortamlar gibi kohezyonsuz zeminlerde kısa sürede, kil ya da siltlerde ise jeolojik karakteristiğine bağlı şekilde zaman endeksli olmaktadır. Bu nedenle sıkışma, kohezyonsuz zeminlerin hakim olduğu sahalarda inşaat aşamasında gerçekleşmekte iken kohezyonlu zeminlerde düşük geçirimsizlik özelliğinden dolayı uzun yıllarda gerçekleşmektedir ve söz konusu bu davranış konsolidasyon olarak adlandırılmaktadır. Kompaksiyon ise zeminin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi için mekanik araçlar kullanarak zemin bünyesindeki su ve tane hacmi sabit iken, havanın dışarı atılması olarak tanımlanmaktadır.

Tüm bu çıkarımlar değerlendirildiğinde suya doygun killi zeminlerde yük altında zamana bağlı olarak aşırı şekil değiştirmeler gözlemlenebilmektedir. Bu olumsuz etkilerden dolayı plastisitenin düşürülmesi, oturmaların azaltılması ve zemin bünyesindeki suyun olumsuz sonuçlar doğurmasının önlenmesi amacıyla zemin ortamına çeşitli iyileştirme malzemeleri gerekmektedir.

Pomza, takviye edildiği zeminlerde hava ve su geçirgenliğini düzenlemekte, infiltrasyonu artırmakta ve buharlaşmayı düşürmektedir. Pomza karıştırılan toprakta, bitki gelişimi iyileşmekte ve verim artmaktadır. Uygulandığı topraklarda çözünabilir iyon kapasitesi çok düşük olduğundan dolayı tuzluluk ve sodikliği, artırmamaktadır. Pomza nötr pH değerine sahip ve ısı iletkenliği düşüktür. Doğal haliyle kullanılması, diğer düzenleyicilere göre ekonomik, hafif ve taşınmasının kolay olması nedeniyle tercih edilen iyi bir materyaldir (Gür vd., 1997).

Kil numunesinin, ince taneli atık pomza malzemesi ile belirli oranlarda karışımından yapılan koni batma likit limit deneyleri sonucunda Çizelge 8'de verilmiştir. Pomza içeriğinin artışı, kil numunesi üzerinde likit limit değerinin azalmasına sebep olmuştur.

Çizelge 8. Değişik oranlarda pomza içeren kil numunesinin koni batma - likit limit grafiği

İnce Taneli Atık Pomza İçeriği (%)	Likit Limit Değeri (%)
0	51
10	48
30	40
50	35

Bilindiği üzere likit limit, zeminin sıvı gibi davranmaya başladığı andaki su muhtevasıdır. Bu yönden pomza karışımı ele alındığında yapı - temel ilişkisi göz önünde bulundurulursa killi zeminlerde pomza karışımı su muhtevasını düşürme eğilimindedir. Kile karıştırılan pomza miktarı arttıkça düşen su içeriğine bağlı olarak kil numunesi likit durumdan uzaklaşmakta plastik hatta yarı katı durum koşullarına ulaşarak daha stabil hale gelmektedir. Bu yönden atık pomza malzemesinin karıştırıldığı suya doygun killi zeminlerin stabilitesine olumlu katkı yapacağı öngörülmektedir. Çimen vd. (2015) çalışmalarında, yüksek plastisiteli killi yol alt yapısı için pomza stabilizasyonunun mekanik özellikleri geliştirdiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar bu doğrultuda, likit limit değerlerinin, pomzanın plastik olmayan bir malzeme olduğundan dolayı pomza oranının artmasıyla birlikte azaldığını ortaya koymuşlardır.

Kil numunesinin, ince taneli atık pomza malzemesi ile belirli oranlarda karışımından yapılan karışımın otomatik modifiye proktor deneyleri sonucunda optimum su içerikleri ve kuru birim hacim ağırlıkları Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9. Değişik oranlardaki pomza içeriğine sahip kil numunesinin optimum su içeriği - kuru birim hacim ağırlık değerleri.

İnce Taneli Atık Pomza İçeriği (%)	Optimum Su İçeriği (%)	Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlığı ( $\gamma_{kmax}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
0,0	9,80	19,81
10,0	10,00	18,74
30,0	14,50	17,52
50,0	15,25	16,13

Kil numunesi içerisindeki pomza miktarı arttıkça optimum su içeriği artmakta ve maksimum kuru birim hacim ağırlığı azalmaktadır. Güneri ve Aksoy (2020), bu davranışın beklenen bir durum olduğunu, bentonit kili – kum karışımlarına belirli oranlarda pomza ilave ederek yürüttükleri çalışmada vurgulamışlardır. Araştırmacılar, pomzanın birim hacim ağırlık değerinin kullanılan kum ve bentonitin birim hacim ağırlık değerlerine göre daha düşük olduğu için karışımın birim hacim ağırlığının azaldığını ifade etmişlerdir.

Yukarıda söz edilen karakteristiklerinden dolayı Türkiye, İtalya ve Yunanistan gibi Akdeniz ülkelerinde pomzanın hafif beton olarak kullanılabilirliğini vurgulayan Amato vd. (2012) malzemenin düşük maliyetli olmasına da dikkat çekmiştir. Bu bağlamda Hossain (2004), volkanik pomzanın inşaat malzemelerinde kullanımı üzerine potansiyeli olduğuna ilişkin çıkarımlarda bulunmuştur. Daha sonra Hossain vd. (2007), zemin iyileştirmesinde bu ve bunun gibi doğal bir biçimde oluşan kaynakların değerlendirilmesine değinmişlerdir. Ayrıca, pomza katkılı fırınlanmış harman (kil) tuğlası üzerine yapılan bir çalışmada, pomza katkı kullanarak tuğlanın birim hacim ağırlığının düşürülmesi ile birlikte yapının ölü yük değerinin azaltılması hedeflenmiştir (Gencel, 2015). %10, %20, %30 ve %40 oranında pomza katkı kullanılarak imal edilen tuğlalar 900°C ve 1000°C'ta 2 saat boyunca fırınlanmıştır ve termal iletkenlik karakteristiği ve su emme kapasitesi incelenmiştir. Araştırmacı bu çalışmaların sonucunda kullanım amacına yönelik olarak pomzanın ideal oranlarda kil ile birlikte kullanımının, stabilite, yalıtım ve su emme özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığını belirtmiştir.

Diğer bir yandan, Gökalp vd. (2011), Ankara'dan çıkarılan bentonit kili ile Kayseri İli Develi İlçesi kökenli pomza malzemesinin farklı karışım oranlarında birlikte kullanarak maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevası değişimlerini inceleyerek sıkışma karakteristiklerini ortaya koymuşlardır. Araştırmacılar bu doğrultuda, ideal pomza tane boyutunu referans alarak pomza - kil karışımlarının pek çok alternatif alanda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Bu örnekte de görüldüğü üzere lokasyon bakımından birbirine yakın olan bölgelerdeki

malzemelerin, mühendislik özellikleri ve finansal açıdan avantaj sağladığı halde bir arada kullanılması yaygın olarak gözlemlenmektedir.

Sonuç olarak, Aksaray İli Hasan Dağı çevresinde atık olarak yığın halinde istiflenen pomza malzemesinin mühendislik özellikleri belirlenerek killi zemin ortamlarında kullanılabilirliği ortaya konmuştur. Avanos kili ile Hasan Dağı ürünü olan pomza ocağı atık malzemesinin karışım oranlarına göre %9,8 ile %15,25 optimum su içerikleri aralığında sırasıyla 19,81 kN/m<sup>3</sup> ile 16,13 kN/m<sup>3</sup> aralığında maksimum kuru birim hacim ağırlığa ulaştığı sonucuna varılmıştır. Böylelikle karışımın, gerek arazide arzu edilen sıkışmanın elde edilmesinde gerek ise yapı malzemesi olarak kullanımı için davranışları ve mühendislik özellikleri ortaya konmuştur. Bu bakımdan, bölgede bulunan suya doymun, kıvamlı killi zemin ortamlarına belirlenen oranlarda atık pomza malzemesi ilave edilerek arazinin zemin özelliklerinin iyileştirilmesi amacına yönelik daha elverişli hale gelebileceği gösterilmiştir. Çalışmada, uygulama yapılacak suya doymun killi ortamlara saha koşullarının taşıma kapasitesi ve su içeriği göz önünde bulundurularak oluşturulan ideal karışımlar neticesinde, suya doymun, çamurumsu ortam daha stabil bir hale getirilmiştir.

Böylelikle, tek başına ayrı ayrı ele alındığında saha koşullarında değerlendirilemeyen iki farklı malzemenin bir arada kullanılarak bölgenin sorunlarının ortadan kaldırılmasına yönelik önü açılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar neticesinde üretim artışı olarak sektöre kazandırılmamış atık konumunda bulunan elek altı pomza malzemesinin killi zemin ortamlarındaki etkinliği ortaya konulmuştur.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, atık pomza malzemesinin temin edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Maden Yüksek Mühendisi Hacı Ali EKEN'e teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

AASHTO T99, 2015. Moisture Density Relations of Soils. American Association of State Highway and Transportation Officials.



- Amato, G., Campione, G., Cavaleri, L., Minafò, G., Miraglia, N., 2012. The Use of Pumice Lightweight Concrete for Masonry Applications. *Materials and Structures*, 45(5), 679-693.
- ASTM D558, 2011. Standard Test Methods For Moisture - Density (Unit Weight) Relations of Soil - Cement Mixtures. American Society for Testing Materials.
- Başpınar, E., Gündüz, L., 2006. İnşaat Endüstrisinde Kullanılan Pomza Agregalarının Mineralojik ve Petrografik Özellikleri. IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul.
- Bozkurt, N., Yurdasal, B., Bozkurt, A. İ., Yılmaz, Ö., Tekin, M., 2016. Respiratory Systems of Dental Technicians Negatively Affected During 5 Years of Follow – up. *Balkan Medical Journal*, 33(4):426.
- BS 1377: Soils for Civil Engineering Purposes, Part 2: Classification Tests, 1990. 4. Determination of the Liquid Limit. British Standart Institution, England.
- BS1377-1, 2016. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes General Requirements and Sample Preparation. British Standards.
- Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J., 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen & Unwin, London. 450p.
- Çimen, Ö., 2006, Effect of Pumice to Unconfined Compressive Strength of a Clay with High Plasticity, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering. Yıldız Technical University, İstanbul, 297.
- Çimen, Ö., Keskin, S. N., Şimşek, S., Kalay, E., 2010. Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Pomza ve Mermer Tozunun Etkisi. Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi, Cilt 2, İstanbul Kültür Üniversitesi, 855-863.
- Çimen, Ö., Saltan, M., Keskin, S. N., 2015. Stabilization of Clayey Subgrade with Waste Pumice for Road Infrastructure. *Science and Engineering of Composite Materials*. Volume 22, Issue 5, Pages 583–590).
- Çimen, Ö., Dereli, B., Keleş, E. 2020. Üç Farklı Bölgeye Ait Pomzanın Yüksek Plastisiteli Kile Etkisinin Karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(1), 427-433.
- Dönmez, M., Akçay, A.E., Kara, H., Türkecan, A., Yergök, A.F., Esentürk, K., 2005. 1/100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları. Aksaray-L32 paftası, MTA., Ankara.
- Ercan, T., 1985. Orta Anadolu'daki Senoziyik Volkanizması. MTA Yayınları, Ankara, s.119-140.
- Erenson, C., Terzi, N. U., Yılmaztürk, F., 2015. Displacement Behavior of Strip Footing on Pile Stabilized in Clayey Earth Slopes. *International Journal of Advanced Research*, Volume 3, Issue 12, 1100 – 1102.
- Ergün, D., Ergün, R., Evcik, E. Öziş, T. N., Akkurt, İ., 2016. The Relation Between the Extent of Radiological Findings and Respiratory Functions in Pneumoconiosis Cases of Dental Technicians who are Working in Ankara. *Tuberk Toraks*, 64(2):127-136.
- Gencil, O., 2015, Characteristics of Fired Clay Bricks with Pumice Additive. *Energy and Buildings*. Elsevier, 102, 217-224.
- Gökalp, Z., Başaran, M., Uzun, O., 2011. Compaction and Swelling Characteristics of Sand-Bentonite and Pumice - Bentonite Mixtures. *Clay Minerals*, 46(3), 449-459.
- Güneri, E., Aksoy, Y. Y., 2020. Pomza Katkısı Varlığında Kum - Bentonit Karışımlarının Hacimsel Deformasyon ve Yüksek Sıcaklık Altında Kayma Davranışlarının İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, Basım Aşamasında.
- Gür, K., Zengin, M., Uyanöz, R., 1997. Pomzanın Tarım ve Çevre Açısından Önemi. 1. Isparta Pomza Sempozyumu, s.125-132, Isparta.
- [http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza\\_erisim\\_tarihi:18.03.2019](http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/pomza_erisim_tarihi:18.03.2019).
- [http://www.maden.org.tr/mevzuat/mevzuat\\_detay.php?kod=25](http://www.maden.org.tr/mevzuat/mevzuat_detay.php?kod=25), erişim tarihi: 01.05.2020. TMMOB, 1990. Maden ve Taşocakları İşletmelerinde ve Tünel Yapımında Tozla Mücadeleyle İlgili Yönetmelik, 14.9.1990 tarih 20635 sayılı Resmi Gazete.
- Head, K. H., 1992. Manual of Soil Laboratory Testing. Volume 1, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., Great Britain.
- Hossain, K. M. A., 2004. Potential Use of Volcanic Pumice as a Construction Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 16(6), 573-577.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M., Easa, S., 2007. Stabilized Soils for Construction Applications Incorporating Natural Resources of Papua New Guinea. *Resources, Concervations and Recycling*, 51(4), 711-731.



- Irvine, T. N., Baragar, W. R. Â., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. Canadian Journal of Earth Science, c.8,523-548.
- Keskin, S. N., Sungur, A., Akan, R., Uzundurukan, S., 2017. İnce Taneli Zeminlerde Katkı Maddelerinin Ve Donma-Çözülme Çevriminin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3), 473-478.
- Köksal, N., Kayhan, S., 2019. Diğer Pnömkonyozlar ve Metallerle Bağlı Akciğer Hastalıkları.
- Lee, N., Baek, K., Park, S., Hwang, I., Chung, I., Choi, W., Jung, H., Lee, M., Yang, S., 2018. Pneumoconiosis in a Polytetrafluoroethylene (PTFE) Spray Worker: a Case Report with an Occupational Hygiene Study. Ann Occup Environ Med. 2018 Jun 4;30:37.
- Moitra, S., Bandyopadhyay A., Moitra S. 2018. Mica Pneumoconiosis: a Neglected Occupational Lung Disease. Lancet Respir Med. 2018 Aug;6(8):e39.
- Na, J. P., Imanaka, M., Suganuma, N. 2017. Japanese Workplace Health Management in Pneumoconiosis Prevention. Journal of Occupational Health. 59(2):91-103.
- Orhan, M., Özer, M., Işık, N. S., 2013. Zemin Mekaniği Laboratuvar Deneyleri. Cilt I, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Rushton, L. 2017. The Global Burden of Occupational Disease. Current Environmental Health Reports. 4(3):340-348.
- Sarı, G., Piyal, B. 2019. Pnömkonyozu Önlemek; Japonya -Türkiye Karşılaştırması, Pneumoconiosis Prevention; Japan - Turkey Comparison. Bozok Medical Journal, 9(04), 162.
- Terzi, N. U., Özsoy, M. U., Yilmazturk, F., Gullu, B., Erenson, C. 2018. Effects of Tire Chips on the Shrinkage and Cracking Characteristics of Clayey Soils. Material in Tehnologije, 52(2), 143-150.
- Transport and Road Research Laboratory, (TRRL), 1993. Cone Penetrometer Test. Crowthorne, Berkshire.





Orijinal Araştırma / Original Research

## DETERMINING THE DRINKING WATER QUALITY IN SEVERAL RURAL SETTLEMENTS IN FERIZAJ MUNICIPALITY, KOSOVA

### KOSOVA FERZOVİK BELEDİYESİ'NİN BİRKAÇ KIRSAL ALANINDA İÇME SUYU KALİTESİNİN BELİRLENMESİ

Sadija Kadriu<sup>a,\*</sup>, Milaim Sadiku<sup>a,\*\*</sup>, Mensur Kelmendi<sup>a,\*\*\*</sup>, Donika Ibishi<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Food Technology, University of Mitrovica, 40000, Mitrovica, KOSOVO

Geliş Tarihi / Received : 23 Mayıs/ May 2020

Kabul Tarihi / Accepted : 10 Temmuz / July 2020

#### Keywords:

Drinking water,  
Water quality,  
Ferizaj villages,  
Heavy metals.

#### ABSTRACT

Suspensions of diverse pollution of groundwater in the villages of Dremjak, Talinoc i Muhaxherve, Softaj, Gërlicë and Varosh of the Ferizaj municipality motivated the investigation of empirical quality of the water wells from which the inhabitants of the villages provided drinking water. Considering that drinking water is the basic element for humans to live, its testing prior to consumption is necessary, therefore, this groundwater is the focus of this research. The samples were taken from the pumping stations, where underground waters were collected. The water was tested for organoleptic, physicochemical, and microbiological parameters, and during the analysis the classical analytical and instrumental methods were applied. The results of the analyses were compared with the Administrative Directive No. 16/2012 of Kosovo and the Instruction No. 98/83 of the EU, based on the standard values of the water quality consumed by humans. Both are in line with the standards of the World Health Organization for drinking water quality. It was determined that the groundwater in the respective five villages was contaminated with heavy metals (Fe, Pb, Mn, Cd and Ni). The water samples taken for analysis based on the underground map of the region show that the underground layers contain metals to some extent. Therefore, the presence of such metals in water is due to geological pollution. However, other organoleptic, physico-chemical and microbiological parameters are compatible with reference values.

#### Anahtar Sözcükler:

İçme suyu,  
Su kalitesi,  
Ferizaj köyleri,  
Ağır maddeler.

#### ÖZ

Ferizaj belediyesinin Dremjak, Talinoc i Muhaxherve, Softaj, Gërlicë ve Varosh köylerindeki yer altı sularının farklı yönde kirletildiğine dair edinilen şüpheler, ilgili köylerde yaşayan sakinlerin içme suyunu sağladıkları su kuyularının ampirik olarak kalitelerinin belirlenmesi amacıyla araştırılmasını motive etmiştir. İçme suyunun insanların yaşamaları için temel unsur olduğu düşünüldüğünde, tüketimden önce test edilmesi gereklidir, bu nedenle bu yeraltı suyu bu araştırmanın odak noktasıdır. Örnekler, yeraltı sularının toplandığı pompa istasyonlarından alınmıştır. Su, organoleptik, fizikokimyasal ve mikrobiyolojik parametreler açısından test edilmiş ve analiz sırasında klasik analitik ve enstrümantal yöntemler uygulanmıştır. Analiz sonuçları, insan tarafından tüketilen su kalitesinin standart değerleri baz alınarak Kosova'nın 16/2012 No'lu İdari Yönergesi ve AB'nin 98/83 No'lu Talimatı'yla karşılaştırılmıştır. Her ikisi de Dünya Sağlık Örgütü'nün içme suyu kalitesinin standartlarıyla uyumludur. İlgili beş köyde yer altı sularının ağır metallerle (Fe, Pb, Mn, Cd ve Ni) kirletilmiş olduğu belirlenmiştir. Bölgenin yeraltı haritasına dayanarak analiz için alınmış su örnekleri, yer altı tabakalarının belli ölçüde metalleri içerdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, bu tür metallerin sularında bulunması jeolojik kirlilikten kaynaklanmaktadır. Halbuki, diğer organoleptik, fiziko-kimyasal ve mikrobiyolojik parametreler referans değerleriyle uyumludur.

\* Sorumlu yazar / Corresponding author : [sadija.kadriu@umib.net](mailto:sadija.kadriu@umib.net) • <https://orcid.org/0000-0001-6223-3342>

\*\* [milaim.sadiku@umib.net](mailto:milaim.sadiku@umib.net) • <https://orcid.org/0000-0002-9387-8124>

\*\*\* [mensur.kelmendi@umib.net](mailto:mensur.kelmendi@umib.net) • <https://orcid.org/0000-0001-7002-2406>

\*\*\*\* [donikaibishi5@gmail.com](mailto:donikaibishi5@gmail.com) • <https://orcid.org/0000-0001-9307-1518>

## INTRODUCTION

It is known that the main worry and preoccupation for humanity is, not only environment care and protection, but also to care for protecting the drinking water from various and many contaminants. The main pollution cause are humans themselves, their relationship with nature and environment in general, because of all-natural resources, water is the most important and should be the most precious. Water is a major natural source and basic human need for life. In recent decades, groundwater has become an essential resource due to its purity and availability (Verma et al., 2013).

Life was started by the water and is nourished by it, because no living organism can live without it. For this reason, since ancient time humans have constructed their settlements near drinking waters. In this context, springs were largely responsible for determining the sites of ancient settlements (Meuli and Wehrle, 2001).

Therefore, just as in the past, also today, and especially for the future ensuring sufficient water constitutes a serious preoccupation for humanity in general. Therefore, humanity today is aware of the fact that the biggest and most serious threat to human wellbeing is not the climate change nor various diseases, but rather obtaining sufficient drinking water, which is not always certain in the nature. Groundwater presumed to be naturally protected, it is considered to be free from impurities, which are associated with surface water, because it comes from deeper parts of the earth. Its quality is significantly affected by geologic formations of aquifers as well as by anthropogenic activities (Thomas, 2000).

The increase of water usage, due to the increasing of population, is accompanied by the reduction of reserves and the contamination of drinking water and natural water (Çullaj, 2010). The water quality in the world has experienced in recent years a deterioration because uncontrolled industrial discharges, intensive use of chemical fertilizers in agriculture well as disorderly exploitation of water resources (Gemitzi et al., 2006).

Therefore, for assessing the drinking water quality, it is appropriate and advisable to conduct monitoring based on the organoleptic physicochemical and microbiological parameters.

The physicochemical quality of drinking water is also based on hydrogeological criteria. These criteria relate to the type of water layer feeding, the composition and structure of the terrain, the level of protection of the water layer etc. (Fawell and Nieuwenhuijsen, 2003).

Numerous scientific researchers conducted in locations around the world have proven that half of the world (especially developing countries) suffer from various dangerous diseases caused by the consumption of water contaminated by various microbes and minerals. Water containing microorganisms spreads various microbe epidemics and infections. Therefore, it is necessary to find various methods for the ordinary examination of drinking water, for the purpose of determining the presence or non-presence of feces. In fact, checking drinking water for all pathogenic microorganisms that may spread through it is not practiced (Regli, 2007).

Water is seriously contaminated by toxic substances such as: heavy metals, pesticides, polycyclic aromatic hydrocarbons, etc. Heavy metals may get through on drinking water sources, in food products and due to their high toxicity can cause serious consequences to human health, therefore, it is necessary that their presence is maintained always under control (Çullaj, 2010).

For the record, the town of Ferizaj constitutes the municipal and regional center located in the southern part of Kosovo, its center being at 42°22'80" of northern latitude and 21°09'12" of eastern longitude, at an average altitude of 850m. Ferizaj Municipality, with the surrounding villages has an area of 345 km<sup>2</sup>. The average annual temperature in Ferizaj Municipality is 10° C, and 9°C in the mountains. The hottest months are July and August with an average temperature of 20.6 and 20.5°C, and the coldest is January with -1.4°C. The precipitation in this region is spread unequally. The average annual amounts vary at circa 673.3 mm in Ferizaj, according to IHMK data. The highest precipitation value is in May at 105.6 mm and the lowest in August at 42.2 mm (Plani I Zhvillimit Komunal. 2017-2025 i Komunës së Ferizajt, 2017).

Therefore, through this paper, we aim to present and confirm the quality of underground water in

Dremjak, Talinoc i Muhaxherve, Softaj, Gërlicë and Varosh villages wells, which administratively belong to Ferizaj Municipality.

## 1. MATERIALS AND METHODS

Samples for analyzing the underground drinking groundwater was taken in five different villages of Ferizaj Municipality, which are presented in Table 1 with coordinates.

Table 1. Sampling points and their coordinates

Sample number	Sampling point	Latitude	Longitude	Altitude (m)
M <sub>1</sub>	Dremjak	4223'08" N	2104'20" E	635
M <sub>2</sub>	Talinoc i Muhaxherëve	4223'33" N	2110'29" E	571
M <sub>3</sub>	Softaj	4224'35" N	2112'10" E	583
M <sub>4</sub>	Gërlicë	4219'27" N	2112'2" E	592
M <sub>5</sub>	Varosh	4220'32" N	2110'35" E	540

The samples were taken at the pumping stations, where the groundwater is collected, and then through the piping system this water is distributed to these villages. The groundwater monitoring points were taken in the following villages: village Dremjak (M1), village Talinoc i Muhaxherëve (M2), village Softaj (M3), village Gërlicë (M4) and village Varosh (M5).

Groundwater monitoring network in these five villages of Ferizaj is presented on the map (Figure 1)

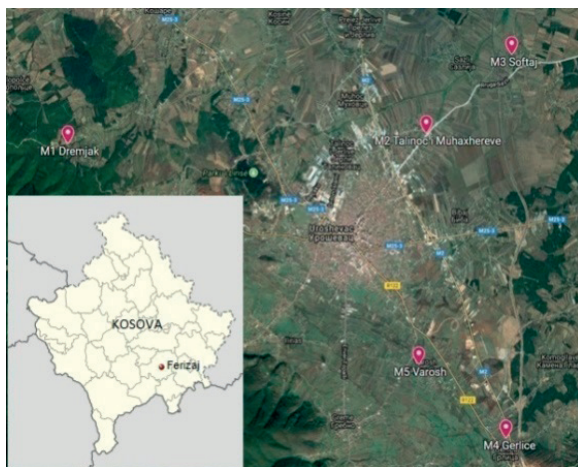


Figure 1. Underground drinking water net

Sampling is of special importance because it is causally related with the accuracy of the results, therefore extra care should be taken while sampling. The mode of sampling, the amount of sample taken and the mode of transport and the maximum time that the sample can stay before chemical analysis is conducted, have been made in accordance with the method's ISO (ISO 5667: 1,3,11).

Their conservation was done in compliance with the conservation procedure of the American Public Health Association, 2005 (APHA, 2005).

During this research, the comparative and visual method was applied to determine organoleptic parameters such as: smell, taste and color, whereas for specifying the physicochemical parameters, at the test lab the following methods were used: potentiometric method - pH value and electrical conductivity; nephelometric method - turbidity; spectrophotometric - ammonia, nitrites, nitrates and Al; and volumetric (titrimetric) method - expenditure of  $\text{KMnO}_4$  and chlorides.

The standard methods applied to analyze each parameter are: pH-ISO 10523:2008; electrical conductivity (ISO 7888:1985); turbidity (ISO 7027:1999); ammonia (ISO 71505:1986); nitrites (ISO 6777:1984); nitrates (ISO 7890-3:1988); expenditure of ( $\text{KMnO}_4$ ), (ISO 8467:1993); chlorides (ISO 9297:1989); Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn, (ISO 15586:2003); Na and K, (ISO 16995:2015).

The microbiological analysis, determining the general number of live bacteria with PCA, was performed pursuant to the EN (ISO 6222:1999) standard.

Preparation of water samples to measure the heavy metals is based on the mineralization of samples by applying the EPA 3015A (US EPA 1994) methods, whereas to determine the concentration of heavy metals in water the SAA-Atomic Absorption Spectrophotometer measuring technique was applied (Perkin Elmer Analyst 400 Atomic Absorption Spectrophotometer), at the environmental analysis lab of the Hydro-Meteorological Institute of Kosova IHMK in Prishtinë.



## 2. RESULTS AND DISCUSSIONS

The results of organoleptic, physicochemical and microbiological analysis, for monitored sampling points, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub>, M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>, M<sub>5</sub> are presented in Table 2 for November 2018, Table 3 for December 2018 and Table 4 for May 2019, Table 5 for June 2019. Whereas, Table 6 contains the values of heavy metals for September 2019.

At this part of the research we have presented the results of the five samples analyzed for the organoleptic, physicochemical and microbiological analysis, taken at the five pumping stations, in five different villages as also presented in the distribution of monitoring points figure (Figure 1).

AI 16/2012 (referring values pursuant to Administrative Instruction 16/2012 of Kosovo)

The monitoring was conducted during November and December 2018 and May and June 2019 for the organoleptic, physicochemical, and microbiological parameters, whereas the heavy metals were analyzed only during September 2019. The physicochemical and microbiological parameters were analyzed at the Public Health Institute in Ferizaj, whereas the heavy metals were analyzed at the Hydrometeorological Institute of Kosovo in Prishtinë.

The results of the samples, presented under Tables 2-6, in relation to the organoleptic,

Table 2. Results of organoleptic, physicochemical and microbiological analysis (November 2018)

November 2018	Unit	AI 16/ 2012	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
Organoleptic parameters							
Smell		None	None	None	None	None	None
Taste		None	None	None	None	None	None
Color		None	None	None	None	None	None
Physic-chemical parameters							
Free chloride (residual)	mg/l	0.2-0.5	0.035	0.021	0.03	0.025	0.033
Turbidity	NTU	2	0.2	0.5	0.59	0.7	0.4
Aluminum	mg/l	0.2	-	-	-	-	-
pH value			7.23	7.45	7.58	7.21	7.7
Expenditure of	mg/l	5	0.39	0.32	0.55	0.8	0.64
Chlorides	mg/l	250	21.45	50.41	31.95	6.04	11.01
Ammonia	mg/l	0.5	0.04	0.0128	0.038	0.089	0.01
Nitrites	mg/l	0.5	0.01	0.071	0.023	0.032	0.03
Nitrates	mg/l	50	-	-	-	-	-
Electrical conductivity	µS/cm	2500	470	818	700	425	393
Microbiological parameters							
Total number of coliform bacteria	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Escherichia Coli	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Number of colonies in 37	Number 100ml	100	0	0	0	0	0

physicochemical and microbiological parameters, at all sampling points are fully compliant with the referring values based on Administrative Instruction 12/2016 of Kosovo (UA 16/2012) on the human consume water quality for human consumption, which is in correlation with EU Directive 98/83, (EU 1998) and the WHO (WHO 2011) on the drinking water quality.

Table 3. Results of organoleptic, physicochemical and microbiological analysis (December 2018)

December 2018	Unit	AI 16/ 2012	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
Organoleptic parameters							
Smell		None	None	None	None	None	None
Taste		None	None	None	None	None	None
Color		None	None	None	None	None	None
Physic-chemical parameters							
Free chloride (residual)	mg/l	0.2-0.5	0.039	0.018	0.035	0.015	0.3
Turbidity	NTU	2	0.22	1	0.55	0.2	0
Aluminum	mg/l	0.2	-	-	-	-	0
pH value			7.4	7.9	7.62	7.96	7.4
Expenditure of	mg/l	5	0.43	0.32	0.65	0.4	0.48
Chlorides	mg/l	250	19.5	53.96	33.25	12.07	6.39
Ammonia	mg/l	0.5	0.03	0.0128	0.02	0.0128	0.0128
Nitrites	mg/l	0.5	0.009	0.0113	0.021	0.00341	-
Nitrates	mg/l	50	-	-	-	-	-
Electrical conductivity	µS/cm	2500	499	755	688	389	195
Microbiological parameters							
Total number of coliform bacteria	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Escherichia Coli	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Number of colonies in 37	Number 100ml	100	0	0	0	0	0

Table 4. Results of organoleptic, physicochemical and microbiological analysis (May 2019)

May 2019	Unit	Al 16/ 2012	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
Organoleptic parameters							
Smell		None	None	None	None	None	None
Taste		None	None	None	None	None	None
Color		None	None	None	None	None	None
Physic-chemical parameters							
Free chloride (residual)	mg/l	0.2-0.5	0.037	0.11	0.07	0.04	0.6
Turbidity	NTU	2	0.4	0.55	0.35	0.64	0.32
Aluminum	mg/l	0.2	-	-	-	-	-
pH value			7.43	7.7	7.4	7.55	7.31
Expenditure of	mg/l	5	0.66	0.62	0.99	0.65	0.73
Chlorides	mg/l	250	283	44.11	8.88	29.88	9.18
Ammonia	mg/l	0.5	0.02	0.005	0.1	0.009	0.003
Nitrites	mg/l	0.5	0.008	0.018	0.038	0.0078	0.001
Nitrates	mg/l	50	-	-	-	-	-
Electrical conductivity	μS/cm	2500	355	529	677	402	265
Microbiological parameters							
Total number of coliform bacteria	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Escherichia Coli	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Number of colonies in 37	Number 100ml	100	0	0	0	0	0

Table 5. Results of organoleptic, physicochemical and microbiological analysis (June 2019)

June 2019	Unit	Al 16/ 2012	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
Organoleptic parameters							
Smell		None	None	None	None	None	None
Taste		None	None	None	None	None	None
Color		None	None	None	None	None	None
Physic-chemical parameters							
Free chloride (residual)	mg/l	0.2-0.5	0.02	0.022	0.035	0.06	0.48
Turbidity	NTU	2	0.4	0.7	0.55	0.33	0.12
Aluminum	mg/l	0.2	-	-	-	-	0
pH value			7.46	7.6	7.69	7.48	7.22
Expenditure of	mg/l	5	0.88	0.42	0.66	0.45	0.33
Chlorides	mg/l	250	25.9	33.96	39.25	34.07	9.22
Ammonia	mg/l	0.5	0.009	0.0045	0.022	0.02	0.009
Nitrites	mg/l	0.5	0.01	0.01	0.018	0.006	0.002
Nitrates	mg/l	50	-	-	-	-	-
Electrical conductivity	µS/cm	2500	389	666	711	388	222
Microbiological parameters							
Total number of coliform bacteria	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Escherichia Coli	Number 100ml	0	0	0	0	0	0
Number of colonies in 37	Number 100ml	100	0	0	0	0	0

Pertaining to the heavy metals, whose results we have presented in Table 6, the situation is as follows: at sampling point M1 we did not encounter any exceeding of the referring values

of heavy metals Fe, Cd, Pb, Mn and Ni, the same situation applies to all sampling points pertaining to the concentration of Cr, Zn, Cu, Na and K.

Table 6. Heavy metals results for September 2019

Samples	Fe	Cd	Pb	Mn	Ni	Cr	Zn	Cu	Na	K
Units	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
	0.001	<0.001	<0.002	0.006	0.011	0.027	0.047	0.051	5.783	1.085
	0.017	0.007	<0.002	0.185	<0.006	0.028	<0.001	0.039	68.8	0.624
	0.086	0.003	<0.002	1.254	0.040	0.023	0.038	0.062	142.9	1.077
	0.219	<0.001	0.103	0.290	<0.006	0.044	0.025	0.048	11.850	0.476
	0.017	<0.001	0.114	0.034	0.041	0.027	<0.001	0.047	5.734	0.452
EU (1998)	0.200	0.003	0.010	0.050	0.020	0.050	-	2	200	12
WHO(2011)										

The graphical presentation of values exceeding the permitted limits, pursuant to EU Directive (EU, 1998) and WHO (WHO, 2011), iron in Figure 2,

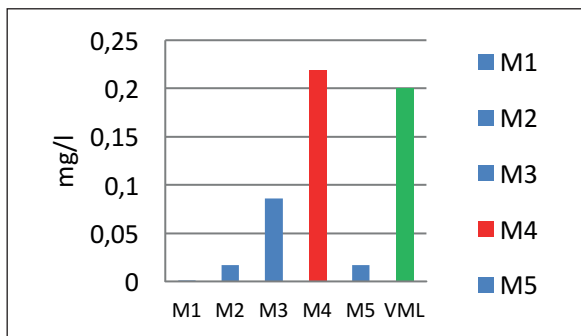


Figure 2. Fe concentration according to sampling points in September 2019

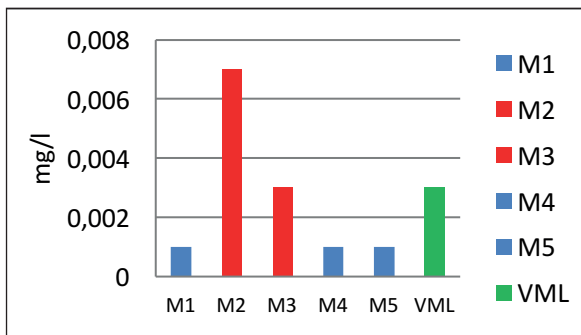


Figure 3. Cd concentration according to sampling points in September 2019

cadmium in Figure 3, lead in Figure 4, manganese in Figure 5, nickel in Figure 6. and common graph of metal concentration in Figure 7.

Pursuant to EU Directive 98/83, the we encountered Fe exceeding referring values at sampling point M4 with a concentration of 0.219 mg/L. Iron is essential element for good health because it transports oxygen in blood. The shortage of iron causes a disease called anemia and prolonged consumption of drinking water with high concentration of iron may lead to liver disease called as hemosiderosis (McDermid and Lønnerdal, 2012).

When cadmium enters the body, it is accumulated in the kidneys and can cause problems such as kidney dysfunction. Brittle bones, lung cancer and acute pneumonia are other health effects that arise from cadmium exposure (Robards and Worsfold, 1991).The Cd concentration in sampling point M3 is at the maximum permitted limit of 0.003 mg/L, whereas at sampling point M2 it exceeded the referring values at 0.007 mg/L.



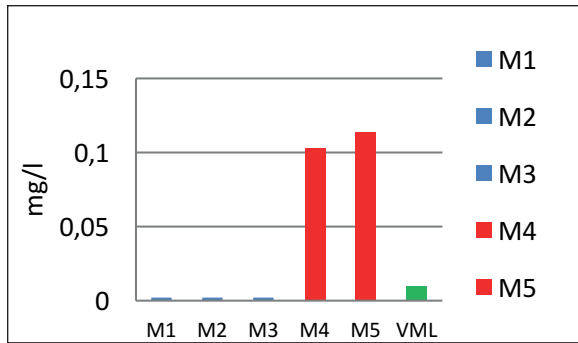


Figure 4. Pb concentration according to sampling points in September 2019

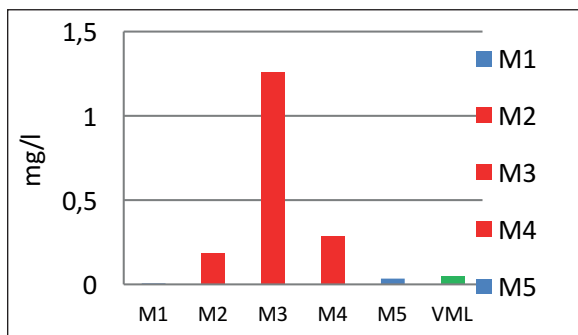


Figure 5. Mn concentration according to sampling points in September 2019

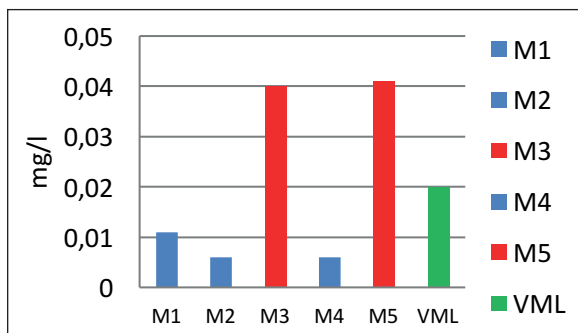


Figure 6. Ni concentration according to sample points in September 2019

We encountered Pb exceeding of referral values at sample points M4 and M5 at 0.103- 0.114 mg/L. Lead is toxic to the central and peripheral nervous system causing neurological and behavior effects. The consumption of lead in higher quantity may cause hearing loss, blood pressure and hypertension and eventually it may prove to be fatal (Terrence at al., 2007).

The table results present the significant exceeding, beyond referring values with Mn

in three sampling points: M2 0.185 mg/L, at M3 1.254 mg/L and at M4 0.290 mg/L. The common presence of Mn in water, according to (ATSDR, 2015) determines the proper functioning of many cell enzymes, whereas the exceeding of referring values with Mn, causes negative health effects such as: muscle weakening, sensory problems, and inappropriate testosterone levels.

Nickel is relatively nontoxic if normal amounts are consumed through water and food. In high concentrations, Ni may cause changes to the respiratory tract - with the appearance of tumors, and skin changes. It also causes mutations to the p53e gene and in cooperation with oncogene V-H-Ras acts as a carcinogen (Rajkovic, 2003). In relation to Ni, we encountered exceeding of referring values at sample points M3 and M5 at the value of 0.040- 0.041 mg/L.

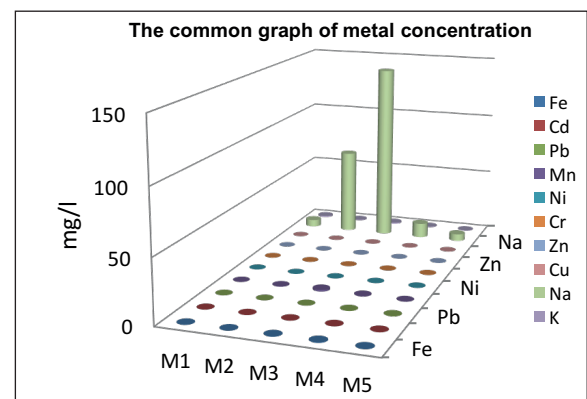


Figure 7. Concentration of metals according to sampling points in September 2019

There are no accurate data on the potential sources of heavy metal contaminants, because there are no hydrogeological studies, but it is thought that the soil composition is one of the causes for the presence of heavy metals, lack of sewerage system that divides wastewater and drinking water, use of fertilizers and other agricultural chemicals, but also the corrosion of water distribution pipes.

### CONCLUSION

In general, groundwaters are considered safe sources for drinking purposes, due to the depth of their location and therefore they are considered

bacteriologically clean. Therefore, our study object was related to the quality of the drinking water of wells in villages Dremjak, Talinoc i Muhaxherve, Softaj, Gërlicë and Varosh in Ferizaj Municipality. The underground waters in these villages, which were analyzed, are used for drinking and other personal needs of the villagers. They are not aware of the presence of some heavy metals exceeding the referring values such as: Mn, Pb, Ni, Cd and Fe, nor about their harming effects that may surface after a period of time, because it is known that metals have the ability to bio accumulate.

There are no accurate data on the causes of contamination with heavy metals of the water used for drinking by the residents of these villages, but it is suspected that it is the soil composition, sewerage system, agricultural chemicals and the corrosion of drinking water supply pipes. Therefore, caring for water, especially drinking water, should be a priority not only for the residents of these villages, but especially for the responsible institutions both at the local and central level. They (institutions) not only are obliged to notify the villagers on the current situation of their water quality, they drink, but to also undertake the required measures to remove the water contamination causes.

## REFERENCES

- APHA, AWWA, WEF, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21st Edition. New York. American Public Health Association. page 70.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), 2015. Toxic Substances Portal.
- Çullaj, A., 2010. Kimia e Mjedisit. Tiranë.
- EU's 1998. Drinking Water Standards. Council Directive 98/83/EC on the Quality of Water Intended for Human Consumption. Adopted by the Council, on 3 Nov. 1998
- Fawell, J., Nieuwenhuijsen, M. J., 2003. Contaminants in Drinking Water. British Medical Bulletin. Vol. 68: 199-208.
- Gemitzi, A., Petalas, C., Tsihrintzis, V. A., Pisinaras, V., 2006. Assessment of Groundwater Vulnerability to Pollution: a Combination of GIS, Fuzzy Logic and Decision-Making Techniques. Environmental Geology. Vol. 49. Issue 5 p. 653-673
- ISO 5667-1: 2006. Water Quality -- Sampling -- Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes and Sampling Techniques.
- ISO 5667-3: 2012. Water Quality -- Sampling -- Part 3: Preservation and Handling of Water Samples.
- ISO 5667-11: 2009. Water Quality -- Sampling -- Part 11: Guidance on Sampling of Groundwaters.
- ISO 6222:1999. Water quality — Enumeration of Culturable Micro-Organisms — Colony Count by Inoculation in a Nutrient Agaroculture Medium.
- McDermid, J.M., Lönnnerdal, B., 2012. Iron. Adv Nutr. 3. pp.532-533.
- Meuli, C., Wehrle, K., 2001. Spring Catchment. (Series of Manuals on Drinking Water Supply, 4). St. Gallen: Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management (SKAT).
- Plani I Zhvillimit Komunal. 2017-2025 i Komunës së Ferizajt. September 2017. Directorate for Urbanism, Planning and Environment, in cooperation with other municipal directorates and sectors. Professionally the document was supported by the consulting company "INSI" Sh.p.k. Ferizaj.
- Rajković M. B., 2003. Neke Neorganske Supstance Koje Se Mogu Naći U Vodi Za Piće I Posledice Po Zdravlje Ljudi. Hemijska industrija. 57(1) s. 24-34.
- Regli S. 2007. Proceedings on Research on Microorganisms in Drinking Water Progress Review Workshop. SDWA Requirements & Microbial Research Needs (Surface Water, Ground Water, & Distribution Systems) Stig Regli-U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water/Office of Ground Water and Drinking Water.
- Robards M. Worsfold P. 1991. Cadmium Toxicology And Analysis - A review: Analyst 116: 549-560.
- Terrence T., John F., Shoichi K., Darryl J., Stephen A., Philip C. 2007. Chemical Safety of Drinking Water: Assessing Priorities For Risk Management. World Health Organ. Geneva.
- Thomas M. 2000. The Effect of Residential Development on Groundwater Quality Near Detroit. Michigan. J. Am Water Resour Assoc. 36. pp. 023-1038.

UA 16/2012. Administrative Instruction No. 16/2012 (AI 16/2012) on the human consume water quality for human consumption.

US EPA Method 3015, 1994 Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts. 'Skip' Kingston. Duquesne University. Pittsburgh. PA USA. Final Version September.

Verma, A., Thakur, B., Katiyar, S., Singh, D., Rai, M., 2013. Evaluation of ground water quality in Lucknow.

Uttar Pradesh using remote sensing and geographic information systems (GIS). International Journal of Water Resources and Environmental Engineering.Vol. 5. Issue 2. p. 67-76.

WHO 2011.Guidelines For Drinking-Water Quality.4th ed. Geneva.World Health Organization.ISBN 978 92 4 154815 1 pp. 541.



ISSN 2564-7024



9 772564 702003