

Cihan Doğruöz

Orijinal Araştırma / Original Research

**Denizli Molas Havzasında Bulunan Sedimanter Kayaçların Cerchar ve Shore Sertliklerinin Tayini ve Bulanık Mantık Uygulaması**

*Determination of Shore and Cerchar Hardness of Sedimentary Rocks in Denizli Molasse Basin and Fuzzy Logic Application*

Mustafa Yavuz Çelik  
Metin Ersoy  
Zeyni Arsoy  
Murat Sert  
Liyaddin Yeşilkaya

Orijinal Araştırma / Original Research

**Iscehisar Andezitlerinin Tuz Kristallenmesine Bağlı Ayrışmasında Su İtici Kimyasal Madde Etkisinin Araştırılması**  
*Investigation of the Effect of Water Repellent Chemicals on the Weathering of Iscehisar Andesites Due to Salt Crystallization*

Özgür Özcan  
Nurettin Alper Toprak  
İbrahim Göktaş

Orijinal Araştırma / Original Research

**Bir Kırma Eleme Tesisinin Performansının Değerlendirilmesi ve Optimizasyonu**

*Performance Evaluation and Optimization of a Crushing-Screening Plant*

Mustafa Özer  
Bekir Başkurt  
Fırat Burat  
Hüseyin Baştürkcü

Orijinal Araştırma / Original Research

**Ön Zenginleştirme Sonrasında Oksalik Asit Kullanımı ile Cam Kumu Tesisi Yan Ürünüden Düşük Demir İçerikli Mikronize Kuvars Üretimi**

*Production of Micronized Quartz With Low Iron Content Using Pre-Concentration Followed by Oxalic Acid Leaching From By-Product of Glass Sand Plant*

Mustafa Emre Yetkin  
Ferhan Şimşir

Orijinal Araştırma / Original Research

**Yürüyen Tahkimat Ünitelerinde Tavan Tabakası ile Tavan Sarması Temaslarında Yük Analizi**

*Load Analysis of Powered Roof Support Units in Support and Strata Interaction*

Ömürden Genç  
A.Hakan Benzer

Orijinal Araştırma / Original Research

**Operational Performance of a Conventional Two-Compartment Ball Mill Grinding Circuit at Different Cement Productions**

*Konvansiyonel İki Kamaralı Bilyalı Değirmen Öğütme Devresinin Farklı Çimento Üretimlerinde İşletme Performansı*



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

Cilt / Vol: 57, Sayı / No: 2, Haziran / June, 2018

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

**Baş Editor / Editor-in-Chief**

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

**Editörler / Editors**

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

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

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

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

**Editör Yardımcıları / Editor Assistants**

Dr. Mustafa Erkayaoğlu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi / *Middle East Technical University*

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

**Derginin Amacı ve Kapsamı**

Bilimsel MADENCİLİK Dergisi, TMMOB Maden Mühendisleri Odası'nın bir yayını olup 1960 yılından bu yana yayımlanmaktadır. Derginin ismi 2016 yılı Haziran sayısına kadar "Madencilik" şeklindeyken, benzer isimli popüler dergilerle karıştırılabilmesi nedeniyle 2016 yılı Eylül sayısından itibaren "Bilimsel Madencilik Dergisi" olarak değiştirilmiş ve o tarihe kadar 0024-9416 olan ISSN numarası da 2564-7024 olarak güncellenmiştir. Dergide yeraltı ve açık ocak işletmeciliği, cevher/kömür hazırlama ve zenginleştirme gibi madencilikğin tüm alanlarında yapılan özgün çalışmalar, eleştirel derlemeler, kısa teknik notlar ve dergide yayımlanmış yazılara ilişkin tartışmalar yayımlanır. Derginin yazım dili Türkçe ve İngilizce'dir. Yılda dört kez (Mart, Haziran, Eylül ve Aralık) yayımlanır. Dergiye elektronik ortamda <http://www.madencilik.org.tr> adresinden erişilebilir. Derginin amacı maden mühendisliği mesleğinin ulusal ve uluslararası düzeyde gelişimine katkı sağlamaktır.

**Aims and Scope of the Journal**

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

## **BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ**

### ***Scientific Mining Journal***

---

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

*Scientific MINING Journal is indexed or abstracted in:*

SCOPUS

Google Scholar

ULAKBİM TR Dizin

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>*

Bilimsel  
**madencilik**  
SCIENTIFIC MINING JOURNAL  
DERGİSİ

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

HAZİRAN

JUNE

2018

CİLT

VOLUME

57

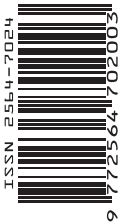
SAYI

NUMBER

2

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Cihan Doğruöz 71 Orijinal Araştırma / Original Research  
**Denizli Molas Havzasında Bulunan Sedimanter Kayaçların Cerchar ve Shore Sertliklerinin Tayini ve Bulanık Mantık Uygulaması**  
*Determination of Shore and Cerchar Hardness of Sedimentary Rocks in Denizli Molasse Basin and Fuzzy Logic Application*
- Mustafa Yavuz Çelik 81 Orijinal Araştırma / Original Research  
Metin Ersoy  
Zeyni Arsoy  
Murat Sert  
Liyaddin Yeşilkaya  
**Iscehisar Andezitlerinin Tuz Kristallenmesine Bağlı Ayrışmasında Su İtici Kimyasal Madde Etkisinin Araştırılması**  
*Investigation of the Effect of Water Repellent Chemicals on the Weathering of Iscehisar Andesites Due to Salt Crystallization*
- Özgür Özcan 95 Orijinal Araştırma / Original Research  
Nurettin Alper Toprak  
İbrahim Göktaş  
**Bir Kırma Eleme Tesisinin Performansının Değerlendirilmesi ve Optimizasyonu**  
*Performance Evaluation and Optimization of a Crushing-Screening Plant*
- Mustafa Özer 109 Orijinal Araştırma / Original Research  
Bekir Başkurt  
Fırat Burat  
Hüseyin Baştürkcü  
**Ön Zenginleştirme Sonrasında Oksalik Asit Kullanımı ile Cam Kumu Tesisi Yan Ürünüden Düşük Demir İçerikli Mikronize Kuvars Üretimi**  
*Production of Micronized Quartz With Low Iron Content Using Pre-Concentration Followed by Oxalic Acid Leaching From By-Product of Glass Sand Plant*
- Mustafa Emre Yetkin 117 Orijinal Araştırma / Original Research  
Ferhan Şimşir  
**Yürüyen Tahkimat Ünitelerinde Tavan Tabakası ile Tavan Sarması Temaslarında Yük Analizi**  
*Load Analysis of Powered Roof Support Units in Support and Strata Interaction*
- Ömürden Genç 125 Orijinal Araştırma / Original Research  
A.Hakan Benzer  
**Operational Performance of a Conventional Two-Compartment Ball Mill Grinding Circuit at Different Cement Productions**  
*Konvansiyonel İki Kamaralı Bilyalı Değirmen Öğütme Devresinin Farklı Çimento Üretimlerinde İşletme Performansı*



9

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

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

Sorumlu yazı işleri müdürü / *Responsible manager: 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: Yorum Matbaacılık*

Baskı Tarihi ve saati / *Printing date: 12.6.2018 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*



Orijinal Araştırma / Original Research

## DENİZLİ MOLAS HAVZASINDA BULUNAN SEDİMANTER KAYAÇLARIN CERCHAR VE SHORE SERTLİKLERİNİN TAYİNİ VE BULANIK MANTIK UYGULAMASI

*DETERMINATION OF SHORE AND CERCHAR HARDNESS OF SEDIMENTARY ROCKS IN DENİZLİ MOLASSE BASIN AND FUZZY LOGIC APPLICATION*

Cihan Doğruöz<sup>a,\*</sup>,

<sup>a</sup> Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 22 Kasım / November 2017

**Kabul Tarihi / Accepted** : 15 Ocak / January 2018

### Anahtar Sözcükler:

Cerchar aşındırıcılık indeksi,  
Shore sertliği,  
Bulanık mantık

### Keywords:

Cerchar abrasivity index,  
Shore hardness,  
Fuzzy logic.

### ÖZ

Bu çalışmada, Denizli ilinin Molas havzasında yapılan iki adet sondaj kuyusundan elde edilen sedimanter kayaçlar üzerinde Shore sertliği, tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Shore sertlik ve tek eksenli basma dayanımı deneyleri Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, kaya mekanik laboratuvarında, Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyi ise Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Toplamda 12 adet farklı özellikte kumtaşı ve kilitaşı üzerinde yapılan deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar ile değişkenler arasındaki korelasyon tayin edilmiş ve bulanık mantık ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre üç farklı değişken kullanılarak Cerchar aşındırıcılık indeksini belirlemede çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile en uygun model oluşturulmuştur. İki uygulamanın da tahmin sonuçları karşılaştırılarak makalede yer verilmiştir.

### ABSTRACT

In this study, Shore hardness, Uniaxial compressive strength and Cerchar abrasivity index tests were applied on sedimentary rocks from two different boreholes in Denizli, Molasse basin. Shore tests and Uniaxial compressive strength tests were applied in Middle East Technical University, Mining Engineering department, rock mechanics laboratory and Cerchar tests were done in Afyon Kocatepe University, Mining Engineering Department laboratories. Totally twelve different sandstone and claystone samples were utilized and the correlation of the variables and fuzzy inference system were also analysed between the parameters. Based on the results, with utilizing three different variables, a multiple linear regression model was created to predict Cerchar abrasivity index. Two different prediction results were compared and mentioned in the study.

\* Sorumlu yazar: [cihan.dogruoz@dpu.edu.tr](mailto:cihan.dogruoz@dpu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-7487-4822>

## GİRİŞ

Cerchar testi kayaçların kazılabilirlik ve kesilebilirliklerini belirlemek için dünya çapında kullanılan basit ama etkili bir yöntemdir. Test sonuçlarına göre değişkenlerin olumlu sonuçlar vermesi, bu testin uygun bir yöntem olduğunu göstermektedir. Diğer kayaç aşınma testlerine kıyasla, testlerin daha kullanışlı ve pratik olması, bu yöntemi daha yaygın hale getirmektedir. Son yıllarda Cerchar testinin kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

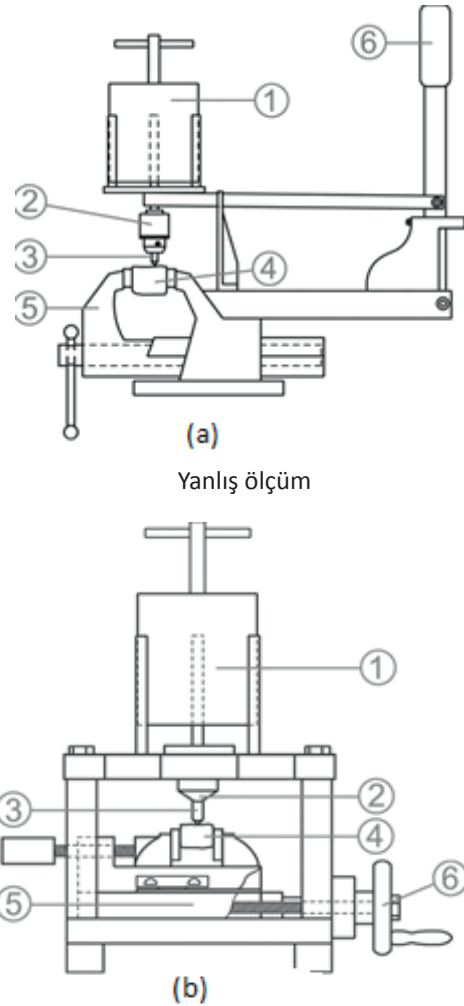
Thuro ve arkadaşları 2007 yılında Cerchar'ın (Cerchar, 1986) standart parametrelerini kullanarak bu yöntemin pratikliğini test etmişlerdir (Thuro vd., 2007). Aynı şekilde Kasling ve Thuro da, 2010 yılında çalışmalarına devam etmişlerdir. Norveç'te bulunan NTNU/SINTEF laboratuvarlarında AVS adında çelik kesici uçlar ile aşındırma testi geliştirilmiştir.

Dahl ve arkadaşları 2012 yılında bu laboratuvarlarda 1590 adet test yapmışlardır ve yöntemin uygunluğunu kanıtlamışlardır (Dahl vd., 2012). Cerchar'ın kelime anlamı "kömür ocakları araştırma merkezi" olan ve Fransa'da 1970'li yıllarda kurulan "Centre d'Etudes et Recherches des Charbonages" araştırma merkezinden gelmektedir. Bu merkezde madencilik sektörü için kömür analizleri yapılırken, tünelcilik sektörü için de bazı bilim adamları çalışmalarını yürütmüşlerdir (Alber 2008; Plinninger vd., 2004).

Cerchar tarafından geliştirilen standartlar ile beraber daha başka standartlar da mevcut olabilmektedir. Cerchar prensibi genel olarak, numuneyi sıkı bir şekilde tutan bir mengene ve 90°'lik açıyla sivrileştirilmiş, üzerine 70 Newton'luk yük uygulanarak numunenin üzerinde çizgi çekilerek yapılan kesme işlemine dayanmaktadır. Çizilen mesafe 10 mm olmaktadır. Cerchar tarafından geliştirilen düzenek Şekil 1a'da gösterilmektedir. West ise 1989 yılında aynı parametreleri kullanarak farklı bir düzenek geliştirmiştir (West, 1989). West'in geliştirdiği bu düzenek ise Şekil 1b'de gösterilmektedir.

Diğer bir kayaç sertlik belirleme deneyi olan Shore testi ise ISRM tarafından kullanılan, Shore skeleroskopu ile gerçekleştirilen ve kayaçların sertliğini tayin eden bir yöntemdir. Shore sertlik testi, kayaçların yüzeyinde serbest düşme

ile yapılan yapılan bir yöntemdir. Deneye tabi tutulan numunelerin çok küçük olması yada mineral içeriklerinin değişken olması deneyin sonuçlarını olumsuz etkileyebilmektedir. Atkinson ve arkadaşlarına göre Shore sertlik deneyi ile tek eksenli basma dayanımı arasında yüksek bir korelasyon olduğu gözlemlenmiştir (Atkinson, vd., 1986). Ancak numunelerde çok miktarda sert kristaller mevcutsa, korelasyon ilişkisi çok doğru sonuçlar vermemektedir. Shore sertlik testleri kesilebilirlik üzerine kesin sonuçlar verse de bazı kayaçlar için aynı sonuçları vermemektedir. Örneğin, kömür numuneleri yüksek Shore sertlik sonuçları vermesine rağmen, galeri açma makineleri tarafından kolayca kesilebilmektedir (Bölükbaşı, 1986).



Şekil 1. a: Cerchar deney düzeneği ve b: West deney düzeneği 1: ağırlık, 2: pin çenesi, 3: çelik pin, 4: numune, 5: mengene, 6: manivela

Literatürlere göre yapılan çalışmalarda Shore sertliğinin kayacın mukavemet özellikleri açısından sertlik dayanımlarında daha etkili olduğu gözlemlenirken, Cerchar sertlik indeksinin daha çok kesilebilirlik ve kazılabilirlik açısından önemli olduğu saptanmıştır.

## 1. CERCHAR TESTİ

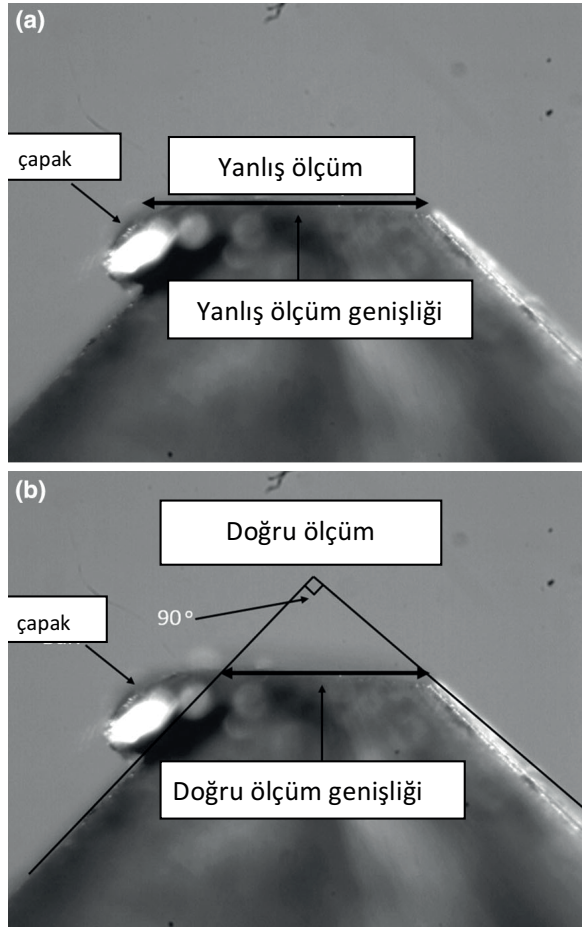
Cerchar testinde en önemli parametrelerden bir tanesi pin sertliğidir. Fransız standartlarına göre bu pinler çelik malzemeden olup Rockwell sertliği olan HRC 54/56'ye göre ısıya dayanıklı olarak imal edilmektedir (Michalakopoulos vd., 2006). Ancak, Dünyadaki çeşitli laboratuvarlarda kullanılan pinlerin çeliği aynı olmamaktadır (Plinninger vd., 2003). Dünya genelinde bazı laboratuvarlar HRC 40 tipi ve daha yumuşak tipte pinler kullanırken, bazı laboratuvarlar ise HRC 54/56 tipte pin kullanmaktadır (Suana ve Peters 1982; West 1989; Al-Ameen ve Waller 1994; Plinninger vd., 2003; Michalakopoulos vd., 2006; Alber 2008; Yarali vd., 2008). Stanford ve Hagan (2009) çelik tiplerin ve sertliğin Cerchar test sonuçlarındaki etkisini çalışmışlardır. Yapmış oldukları bu çalışma, aynı sertlikte ısıya dayanıklı yedi farklı metal ve dokuz farklı seviyede tek çeşit çelik içermektedir. Çalışmalarındaki çelik tipleri HRC 50 ve HRC 55 arasında değişen ve çeşitli derece ve alaşımlarda meydana gelen malzemelerdir. Çelik tipleri olarak gümüş çeliği, H13, M340, CALMAX, SVERKER, 3, Rigor ve S600 kullanmaktadır. Farklı çelik tipleri fakat aynı sertlikte pinler ile yaptıkları çalışmalar neticesinde aynı sertlikte çelik ve istenilen sertlik derecesi arasında çok önemli bir fark olmadığını görmüşlerdir. Stanford ve Hagan'ın çalıştığı yedi çelik tipinin gerçek sertliği HRC 50 ve 55 arasında değişen ve dayanım sıralaması da 1.606 ve 1.889 MPa arasında olan sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum ise Cerchar testinde sadece çelik tipi esaslı pin seçiminin tek başına çok önemli etkilerinin olmadığını ortaya koymaktadır. Stanford ve Hagan, aynı çelik ve farklı sertlikler ile çalışmışlardır ve elde ettikleri sonuçlara göre Cerchar değeri doğrusal olarak düştükçe pin sertliğinin arttığı görülmektedir. Michalakopoulos ve arkadaşları da, 2006 yılında CAI40 ve CAI55

arasında doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır (Michalakopoulos vd., 2006).

Cerchar standartlarına göre çizgi mesafesi 10 mm olmalıdır. Bazı araştırmacılar, çizim boyunca çelik pinin tepe noktasındaki aşınma miktarının, numunenin sertlik ve dayanımının bir fonksiyonu olduğunu gözlemlemişlerdir (Hamzaban vd., 2013). Cerchar deneyinde tavsiye edilen test sayısı, ince taneli ve homojen kayaçlar için 2-3 adet çizim, normal ve iri taneli numuneler için ise 5 ve daha fazla çizim yapılmalıdır (Plinninger vd., 2003). West'e göre (1989) en az 5 adet çizim yapılması daha uygundur ve genelde birçok araştırmacı en az 5 adet deney yapmaktadır (Plinninger vd., 2003; Yarali vd., 2008). Deney esnasında numunenin maruz kaldığı yükün altında CAI değerlerinin arttığı görülmektedir (Alber, 2008). Numunenin çizim yüzeyi ile ilgili belli bir standart bulunmamaktadır. Bazı araştırmacılar düz yüzey üzerinde deneyi gerçekleştirirken, bazıları ise pürüzlü yüzeylerde deneyleri gerçekleştirmişlerdir (Suana ve Peters 1982; West 1989; Alber 2008; Yarali vd., 2008; Stanford ve Hagan 2009). Ayrıca Al-Ameen ve Waller'a (1994) göre yüzeyin bittiği yerin sonuçlara çok büyük bir etkisi olmadığı görülmektedir. Plinninger'da 2003 yılında düşük CAI değerleriyle aynı görüşleri teyit etmektedir (Plinninger, 2003). Ancak, çalışmalarında CAI değerlerinin, sert kayaçlarda düz yüzeylere kıyasla pürüzlü yüzeylerde 0.5 birim (yada 0.05 mm) daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Rostami ve arkadaşları da 2005 yılında yapmış oldukları çalışmalarda aynı sonuçları elde etmişlerdir (Rostami vd., 2005). Kasling ve Thuro'ya göre anizotropik kayaçlarda ve kusursuz okumalarda sonuçlar, aşınma ucu ve çelik pinlerle uyum içerisinde bulunmaktadır (Kasling ve Thuro, 2010).

Cerchar deneyleri esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli parametre çizim işleminden sonra mikroskop ortamında aşınan çelik pinlerin çok dikkatli bir şekilde okunmasıdır. Şekil 2'de Rostami ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptıkları çalışmaya göre doğru ve yanlış okuma yöntemleri gösterilmektedir. Çelik pinler çok hassas bir çizim ve aşındırma yaptıklarından, okuma işleminin çok dikkatli ve itinalı yapılması gerekmektedir.





Şekil 2. Cerchar çelik pinlerin (a) yanlış ve (b) doğru ölçüm şekilleri (Rostami vd., 2014)

## 2. SHORE TESTİ

Shore sertliği ISRM tarafından kullanılan ve tavsiye edilen, kayaların sertliklerinin belirlenmesinde, Shore skeleroskop adı verilen ölçüm cihazıyla yapılan bir deney şeklidir (ISRM, 2007). Şekil 3'te Orta Doğu Teknik Üniversitesinde kullanılan C-2 tipi Shore deney ölçüm cihazı bulunmaktadır.

Shore skeleroskop, tungsten karbit malzemesinden oluşan ve belli bir sivrilikteki uca sahip olan bir metalin, dikey bir tüpün içerisinde serbest düşürülmesi ile oluşan sıçrama yüksekliği ölçümünün yapıldığı deney türüdür. Uygulama, yaklaşık 30 cm yükseklikten elmas ya da tungsten karbit ucun karot üzerine düşürülmesiyle gerçekleştirilir. Daha sonar uç sıçrama yaparak tüpün üzerindeki ölçeklendirme sayesinde belli bir yüksekliğe sıçrama gerçekleştirir. Deneyin yapılacağı numune yüzeyi düz olmalıdır ve 10

cm<sup>2</sup> yüzey hacmi yeterli olmaktadır. Deney 20 kez tekrar edilir ve ortalaması alınarak sonuçlar elde edilir (ISRM, 2007). Bazı uygulamalarda kayacın yapısına göre en düşük 10 değer atılarak geriye kalan en yüksek 10 değerin ortalaması hesaplanmaktadır.



Şekil 3. C-2 tipi Shore skeleroskopu

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Denizli ilinin Molas havzasında yapılan iki adet sondaj kuyusundan elde edilen 54.7 mm çapında ve NX standartlarındaki sedimanter kayalar üzerinde Shore sertlik deneyi, Tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de yer almaktadır. Kuyu-1'den 5 adet ve Kuyu-2'den 7 adet olmak üzere toplam 12 adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Shore sertlik deneyleri ve tek eksenli basma dayanımı Orta Doğu Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği kaya mekanik laboratuvarında, Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyleri ise Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar arasındaki korelasyon incelenmiş olup, sonuçlar arasında çoklu doğrusal regresyon analizi yapılarak aşığıdaki bağıntı bulunmuştur.

$$CAI = -0.005 - 0.001 * UCS + 0.003 * SH \quad (1)$$

Çizelge 1. Kayaçların Shore sertliği, tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeksi sonuçları

| Kuyu No | Kayaç Kodu | Kayaç Adı                | Sh. No | CAI No | UCS(MPa) |
|---------|------------|--------------------------|--------|--------|----------|
| K-1     | B1         | Grimsi renk kumtaşı      | 30     | 0.09   | 12.39    |
|         | B2         | Kumlu grimsi kilitaşı    | 25     | 0.09   | 24.63    |
|         | B3         | Yeşilimsi kilitaşı       | 13     | 0.02   | 42.73    |
|         | B4         | Açık gri kilitaşı1       | 14     | 0.02   | 16.76    |
|         | B5         | Koyu grifosilli kilitaşı | 23     | 0.03   | 21.78    |
| K-2     | B6         | Yeşilimsi kumtaşı        | 17     | 0.03   | 20.53    |
|         | B7         | Beyazımsı kilitaşı       | 17     | 0.05   | 20.81    |
|         | B8         | Yeşilimsi kumtaşı        | 22     | 0.04   | 18.80    |
|         | B9         | Grimsi ince kumtaşı      | 20     | 0.07   | 21.76    |
|         | B10        | Grimsi kilitaşı          | 23     | 0.04   | 18.77    |
|         | B11        | Açık gri kumtaşı         | 15     | 0.02   | 33.85    |
|         | B12        | Açık gri kilitaşı2       | 24     | 0.03   | 45.27    |

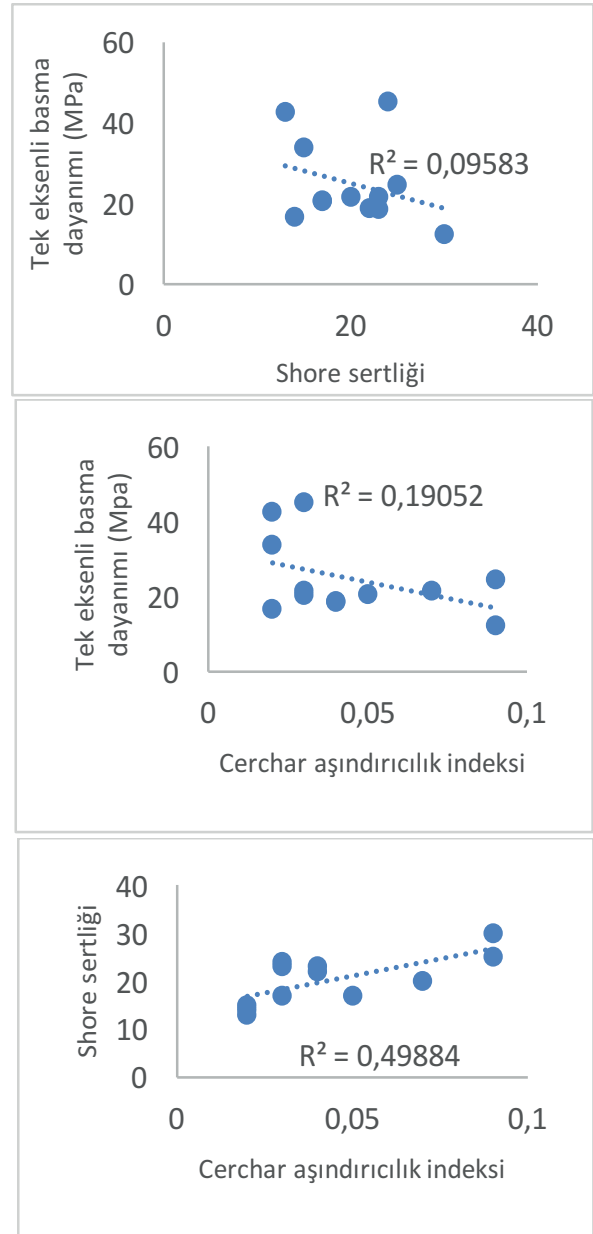
Burada CAI; Cerchar aşındırıcılık indeksini, UCS; Tek eksenli basma dayanımını (MPa) ve SH; Shore sertliğini ifade etmektedir.

Parametreler arasındaki  $R^2$  belirlilik katsayısı değerleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre en yakın doğrusallık ilişkisini Cerchar ve Shore parametrelerinin verdiği görülmektedir. Çizelge 1'de 12 farklı kumtaşı ve kilitaşı numuneleri görülmektedir. Bu çalışmada, numunelerin petrografik açıdan hangi renkte oldukları saptanarak Çizelge 1'de verilmiştir. Mineralojik anlamda kayaçların farklı renkte olması, o kayaçların birbirinden değişik özelliklerde olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kumtaşı ve kilitaşı numuneleri toplamda 12 adet farklı numune şeklinde analizi yapılmıştır.

Shore sertliği ve Cerchar aşındırıcılık indeksi arasında diğer parametrelere göre daha doğrusal bir ilişki olduğu Şekil 4'te görülmektedir.

#### 4. BULANIK MANTIK

Bulanık mantık yöntemi son yıllarda madencilik sektöründe de kullanılmaya başlanmıştır. Bazı araştırmacılar, yakın zamanda bulanık mantık yöntemi ile kaya mekanik ve mühendislik jeolojisi konularında araştırmalar yapmışlardır (Alvarez Grima ve Babuska, 1999; Finol vd.,

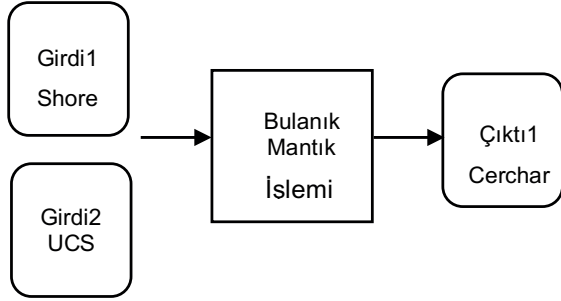


Şekil 4. Cerchar, Shore ve Tek eksenli basma dayanımı değerleri arasındaki korelasyon

2001; Gokceoglu, 2002). En yaygın bulanık mantık uygulaması Mamdani, Tagaki-Sugeno-Kang algoritmaları olmaktadır. Bu çalışmada Mamdani algoritması tercih edilmiştir. Sebebi ise mühendislik jeolojisi konularında daha kesin sonuçlar vermesidir.

Yapılan bu çalışmada, Shore sertliği, tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar aşındırıcılık indeksi deneyleri bulanık mantık içerisinde Girdi ve Çıktı parametreleri olarak değerlendirilmiştir. Öncelikle

girdi ve çıktı değerlerinin analizi için algoritma oluşturulmuştur. Bulanık sistemlerde kullanılan üyelik fonksiyonlarının en önemli avantajı, bulanık kümeler arasındaki tedrici geçişlerin sağlanması ve bir elemanın herhangi bir bulanık kümeye ait olma derecesini gösteren üyelik derecelerinin atanmasıdır.



**Şekil 5. Girdi ve çıktı parametrelerinin algoritması**

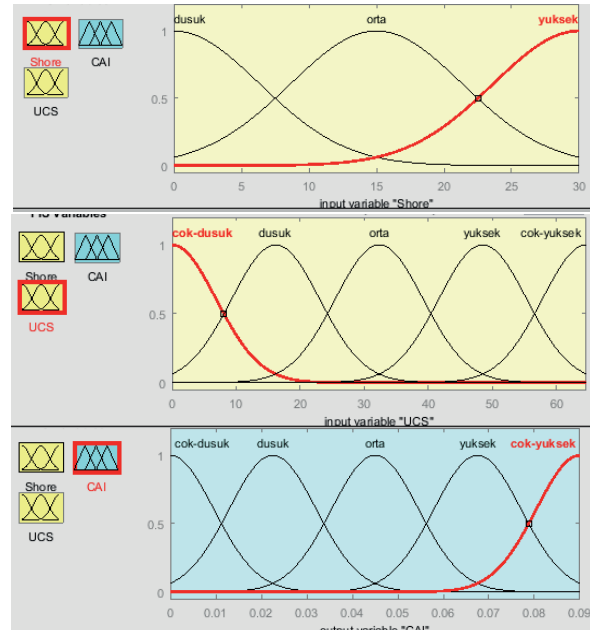
Şekil 5'te Shore sertliği, tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar parametreleri için oluşturulan algoritma yer almaktadır. Oluşturulan algoritmaya göre, programda Girdi1 (input1), Girdi2 (input2) ve Çıktı1 (output1) şeklinde 3 adet değişken mevcuttur. Bu değişkenler, ASTM standartlarına göre sertlik dayanımlarından elde edilen Shore indeksi 20'nin altında düşük, 20-60 arasında orta ve 60'dan büyük ise yüksek olacak şekilde sınıflandırılarak bulanık mantık içerisinde analiz edilmiştir. Tek eksenli basma dayanımı için 6'nın altında çok düşük, 6-20 arasında düşük, 20-60 arasında orta, 60-200 arasında yüksek ve 200'ün üstünde çok yüksek olacak şekilde değerlendirilmiştir. Cerchar parametresi için ise HRC 55 normlarına göre 0.30-0.50 çok düşük, 0.50-1.00 düşük, 1.00-2.00 orta, 2.00-4.00 yüksek ve 4.00-6.00 çok yüksek aşınma değer aralıkları şeklinde bulanık mantık içerisinde sisteme girilmiştir. Bulanık mantık içerisinde girilen değer aralıkları ile oluşturulan model aşağıdaki şekilde gösterilmektedir;

Shore (Girdi 1)  
 Düşük (D) = [0 0 20]  
 Orta (O) = [20 20 60]  
 Yüksek (Y) = [60 60 100]

Tek Eksenli Basma (Girdi2)  
 Çok Düşük (CD) = [0 0 6]  
 Düşük (D) = [6 6 20]  
 Orta (O) = [20 20 60]  
 Yüksek (Y) = [60 60 200]  
 Çok Yüksek (CY) = [200 200 300]

Cerchar (Çıktı1)  
 Çok Düşük (CD) = [0 0 0.5]  
 Düşük (D) = [0.5 0.5 1]  
 Orta (O) = [1 1 2]  
 Yüksek (Y) = [2 2 4]  
 Çok Yüksek (CY) = [4 4 6]

Shore sertliği, tek eksenli basma dayanımı ve Cerchar indeksleri için belirlenen değer aralıkları bulanık mantık içerisinde işlenmiştir. Değerler girildikten sonra Girdi1, Girdi2 ve Çıktı1 parametreleri grafiksel olarak değer aralıklarıyla beraber Şekil 6'da gösterilmektedir.

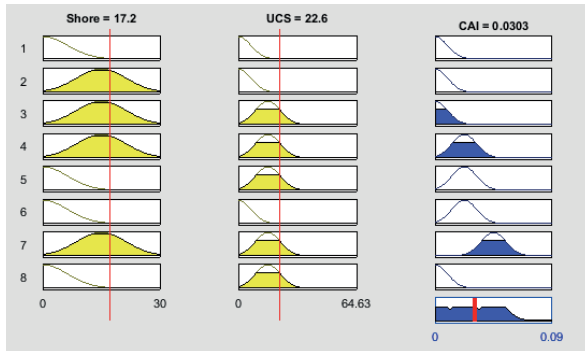


**Şekil 6. Shore, Tek eksenli basma dayanımı (Girdi1 ve Girdi2) ve Cerchar (Çıktı1) parametrelerinin bulanık mantık kümeleri**

Şekil 6'da görüldüğü üzere Shore için düşük, orta ve yüksek değer aralıkları tanımlanmıştır. Tek eksenli basma dayanımı için ise çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde aralıklar tanımlanmıştır. Cerchar için ise çok düşük, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek şeklinde

değer aralıkları tanımlanmıştır. Bulanık mantık uygulamalarında oluşturulan veri setlerinde birden fazla parametre ile analiz yapmak daha etkin sonuçları beraberinde getirmektedir. Eğer birden fazla Girdi ve Çıktı parametreleri kullanılacak ise, değer aralıklarını oluşturmak için çok hassas ve düzgün bir şekilde veritabanını oluşturmak gerekmektedir.

Bulanık mantık içerisinde Girdi1 (Shore) için üyelik fonksiyonları 3 adet, Girdi2 (Tek eksenli) üyelik fonksiyonları için 5 adet ve Çıktı1 (Cerchar) için ise üyelik fonksiyonları 5 adet olarak girilmiştir. Dolayısıyla [3 5 5] şeklinde kombinasyon meydana getirilmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan sedimanter kökenli kilitaşı ve kumtaşı numuneleri genel itibariyle düşük sertliklere sahip olduğundan toplam 8 adet eğer-o zaman kuralına dayalı olarak bulanık kural uygulanmıştır. Bu kombinasyonlar ortam şartlarını belirlemektedir. Bu çalışmada kullanılan bulanık kurallar şu şekildedir; Shore (Girdi1), Tek eksenli (Girdi2) ve Cerchar (Çıktı1) sırasını takip etmek suretiyle; düşük-çokdüşük-çokdüşük, orta-çokdüşük-çokdüşük, orta-düşük-çok düşük, orta-düşük-düşük, düşük-düşük-düşük, düşük-çokdüşük-düşük, orta-orta-orta, orta-düşük-orta ve düşük-düşük-çokdüşük şeklinde toplam 8 adet bulanık kural kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada, bulanık mantık içinde en büyük dereceli elemanlardan küçük olanı durulaştırma yöntemi tercih edilmiştir.

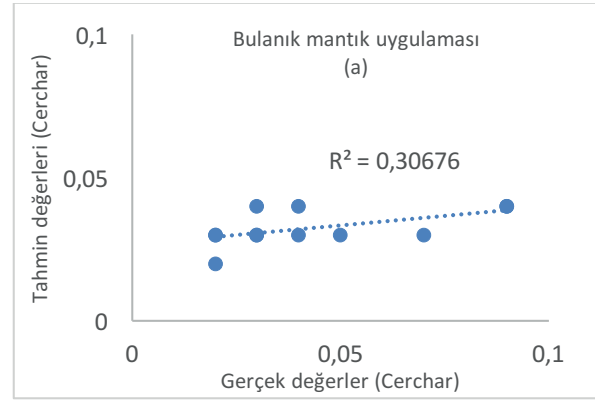


Şekil 7. Bulanık mantık Shore (Girdi1), Tek eksenli (Girdi2) ve Cerchar (Çıktı1) koşulları ve tahmin yöntemi

Şekil 7'de görüldüğü üzere üyelik fonksiyonları arasında gerekli kombinasyonlar yapılarak uygun kurallar seçilmiş ve Shore ve Tek eksenli

parametrelerini girerek Cerchar parametresini tahmin eden model oluşturulmuştur. Girdi ve Çıktı değişkenleri çoğaldıkça veri tabanı daha çok üyelik fonksiyonu ile daha kompleks bir yapıda olmaktadır. Dolayısıyla kombinasyonlar artarak, daha doğru ve kesin tahminler elde edilmektedir.

Elde edilen bulanık mantık tahmin sonuçları ile çoklu doğrusal regresyon tahmin sonuçları, gerçek Cerchar verileri ile karşılaştırılarak Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. a: Bulanık mantık ve b: çoklu doğrusal regresyon uygulamaları için gerçek ve tahmini değerler karşılaştırması

Çoklu doğrusal regresyon modelinden elde edilen tahmin sonuçlarının belirlilik katsayısı  $R^2=0,5652$  iken, bulanık mantık uygulamasının tahmin sonuçları belirlilik katsayısı  $R^2=0,3068$  olmaktadır.

## SONUÇLAR

Sedimanter kayaçların sertlik dayanımları kesilebilirlik ve kazılabilirlik açısından önem arz etmektedir. Kayaçların kaya mekaniksel dayanımları açısından sertliklerinin tayin edilmesi, kazılabilirlik için büyük bir rol oynamaktadır. Bilindiği üzere kayaçlar genel olarak yumuşak, orta sertlikte ve sert kayaç şeklinde ifade edilmektedir. Belli değer aralıklarına göre bu sınıflamaların standartları bilim insanları tarafından indekslenmiştir. Bazı araştırma merkezleri de bu indeksleri geliştirerek daha pratik ve uygulama açısından daha kullanışlı standartlar oluşturmuşlardır. Bu çalışmada

ise sedimanter kayaçlar üzerinde bazı sertlik deneyleri uygulanmıştır. İncelenen parametreler arasında çok anlamlı bir ilişkinin olmadığı anlaşılmıştır. Ancak bulanık mantık ve çoklu doğrusal regresyon uygulamalarından elde edilen gerçek ve tahmin değerleri karşılaştırıldığında, çoklu doğrusal regresyon modelinin diğerlerine göre daha yakın tahmin sonuçları verdiği görülmüştür.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, Bölüm laboratuvar imkanlarını esirgemeyen Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Sedat Büyüksağış, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkanı Prof. Dr. Celal Karpuz ve Doç. Dr. M. Serkan Akkiraz hocalarımıza katkılarından dolayı teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

Al-Ameen, S., Waller, M., 1994. The Influence of Rock Strength and Abrasive Mineral Content on the Cerchar Abrasive Index. Eng. Geol., 36, 293–301.

Alber, M., 2008. Stress Dependency of the Cerchar Abrasivity Index (CAI) and Its Effects on Wear of Selected Rock Cutting Tools. Tunn. Undergr. Space Technol., 23, 351–359.

Alvarez Grima, M., Babuska, R., 1999. Fuzzy Model for the Prediction of Unconfined Compressive Strength of Rock Samples. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 36, 339–349.

Atkinson, T., Cassapi, V.B., Singh, R.N., 1986. Assessment of Abrasive Wear Resistance Potential in Rock Excavation Machinery. International Journal of Mining and Geological Engineering, Technical Note, 3, 151-163.

Bölükbaşı, N., 1986. Yeraltı Kömür ve Ayak Kazı Mekanizasyonu. TKİ Genel Müdürlüğü Seminerleri No.4, Mining Eng.Dept. METU, Ankara.

Cerchar, 1986. Centre d'Etudes et Recherches de Charbonnages de France. The CERCHAR abrasiveness index, Verneuil 12S.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grov, E., 2012. Classifications of Properties Influencing the Drillability of Rocks, Based on the NTNU/SINTEF Test Method. Tunn Undergr Space Technol, 28, 150–158.

Finol, J., Guo, Y. K., Jing, X. D., 2001. A Rule Based Fuzzy Model for the Prediction of Petrophysical Rock Parameters. Journal of Petroleum Science and Engineering, 29, 97–113.

Gokceoglu, C., 2002. A Fuzzy Triangular Chart to Predict the Uniaxial Compressive Strength of Ankara Agglomerates from Their Petrographic Composition. Engineering Geology, 66, 39-51.

Hamzaban, M.T., Memariana, H., Rostami, J., 2013. Continuous Monitoring of Pin Tip Wear and Penetration Into Rock Surface Using a New Cerchar Abrasivity Testing Device. Rock Mech Rock Eng.

ISRM, 2007. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

Kasling, H., Thuro, K., 2010. Determining Abrasivity of Rock and Soil in the Laboratory. In: 11th IAEG Congress, Auckland, New Zealand, 235.

Michalakopoulos, T., Anagnostou, V., Bassanou, M., Panagiotou, G., 2006. The Influence of Steel Styli Hardness on the Cerchar Abrasiveness Index Value. Int J Rock Mech Min Sci, 43, 321-327.

Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., Spaun, G., 2003. Testing Conditions and Geomechanical Properties Influencing the Cerchar Abrasiveness Index (CAI) Value. Int J Rock Mech Min Sci, 40, 259-263.

Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K., 2004. Wear Prediction in Hardrock Excavation Using The Cerchar Abrasiveness Index (CAI). In: Proceedings of the Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium, 599-604.

Rostami, J., Ozdemir, L., Bruland, A., Dahl, F., 2005. Review of Issues Related to Cerchar Abrasivity Testing and Their Implications on Geotechnical Investigations and Cutter Cost Estimates. In: Proceedings of the RETC, 738-751.

- Rostami, J., Ghasemi, A., Gharahbagh, E., Dogruoz, C., Dahl, F., 2014. Study of Dominant Factors Affecting Cerchar Abrasivity Index. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 1905-1919.
- Stanford, J., Hagan, P., 2009. An Assessment of the Impact of Stylus Metallurgy on Cerchar Abrasiveness Index. In: *Proceedings of the Coal Operators' Conference*, 348-355.
- Suana, M., Peters, T., 1982. The Cerchar Abrasivity Index and Its relation to Rock Mineralogy and Petrography. *Rock Mech.*, 15, 1-7.
- Thuro, K., Singer, J., Kasling, H., Bauer, M., 2007. Determining Abrasivity with the LCPC Test. In: Eberhardt E, Stead D, Morrison T (eds) *Proceedings of the 1st Canada–U.S. rock mechanics symposium*, 27.
- West, G., 1989. Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 2, 151-160.
- Yarali, O., Yasar, E., Bacak, G., Ranjith, P., 2008. A Study of Rock Abrasivity and Tool Wear in Coal Measures Rocks. *Int J of Coal Geol.*, 74, 53-66.





Orijinal Araştırma / Original Research

## İSCEHİSAR ANDEZİTLERİNİN TUZ KRİSTALLENMESİNE BAĞLI AYRIŞMASINDA SU İTİCİ KİMYASAL MADDE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WATER REPELLENT CHEMICALS ON THE WEATHERING OF İSCEHİSAR ANDESITES DUE TO SALT CRYSTALLIZATION

Mustafa Yavuz Çelik<sup>a,\*</sup>, Metin Ersoy<sup>a,\*\*</sup>, Zeyni Arsoy<sup>a,\*\*\*</sup>, Murat Sert<sup>b,\*\*\*\*</sup>, Liyaddin Yeşilkaya<sup>a,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapı Taşları Programı, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 4 Aralık / December 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 30 Mart / March 2018

### ÖZ

**Anahtar Sözcükler:**  
Andezit,  
Tuz kristalizasyonu,  
Su itici kimyasal madde,  
Gözeneklilik,  
Ağırlık kaybı.

Bu çalışmada Afyonkarahisar yöresinde üretilen İscehisar andezitlerinde tuzların yıkıcı etkileri sonucu oluşan bazı fiziksel ve mekanik değişiklikler incelenmiştir. Bu amaçla çalışma kapsamında andezitlerin petrografik-mineralojik (polarizan mikroskop, XRD), kimyasal analiz, gözenek çapı dağılımı ve fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiştir. İkinci aşamada da su emmeyi ve dolayısıyla da tuz kristallendirmeyi önlemek amacıyla da su itici ve koruyucu kimyasal maddeler kullanılan andezit numunelerinde aynı deneyler tekrarlanmıştır. Andezit numunelerinin tuz kristallendirme olaylarına bağlı ayrışma miktarları, ağırlık kaybı, ultrases hızı ve tek eksenli basınç dayanımı gibi bazı fiziksel ve mekanik parametrelerde meydana gelen değişimler yardımıyla belirlenmiştir. Normal numunelerde ortalama %0,3695 kuru kütle kaybı, su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise ortalama %0,186 kütle artışı ölçülmüştür. Basınç dayanımı değerleri normal numunelerde %32, su itici kimyasal uygulanmış numunelerde %37 azalmıştır.

### ABSTRACT

**Keywords:**  
Andesite,  
Salt crystallization,  
Water repellent chemical,  
Porosity,  
Weight loss.

In this research, some physical and mechanical changes in İscehisar andesites produced in Afyonkarahisar region were investigated because of destructive effects of salts. For this purpose, petrographic-mineralogical (polarizing microscope, XRD), chemical analysis, pore diameter distribution and physico-mechanical properties of andesites were determined. In the second step, the same experiments were repeated in the case of andesite samples using water repellent and protective chemical substances to prevent water absorption and consequently salt crystallization. The amounts of decomposition due to salt crystallization events of the andesite samples were determined by the changes in mechanical and physical properties like weight loss, ultrasonic velocity and uniaxial compressive. Mean dry weight loss was 0.3695% in normal samples and 0,186% mass increase in water-repellent samples. Compressive strength values were found to be 32% for normal samples and 37% for water repellent chemically treated samples.

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

\*\* metinersoy@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7997-6847>

\*\*\* zeyniarsoy@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5694-6338>

\*\*\*\* msert@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5376-9874>

\*\*\*\*\* yesilkay@aku.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-8911-48531>



## GİRİŞ

Tarihin değişik dönemlerinde farklı yapı malzemeleri kullanılmıştır. Günümüze kadar gelmiş olan tarihi yapıların, doğal taşlardan yapılmış olduğu görülmektedir. Tüm uygarlıkların doğal taşları tercih etmelerinin nedeni, taşıyıcı niteliği ve mimari özellikleri yanı sıra dayanıklı olmalarıdır. Antik dönemlerde kabaca şekillendirilerek, yapıların değişik yerlerinde taşıyıcı amaçlı kullanılan doğal taşlar, teknolojik gelişmelere paralel olarak değişik şekillerde işlenerek farklı amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğal taşların en çok kullanılanlarından birisi de andezitlerdir (Yavuz vd., 2017).

Ülkemizde İç Anadolu ve Ege Bölgeleri'nde yaygın olarak bulunan andezit oluşumları volkanik kayalar içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Çankırı, Niğde, Kayseri, Ankara, Afyon, Isparta, Çanakkale, İzmir, Balıkesir ve Uşak başlıca andezit üretimi yapılan iller arasındadır. Andezitler geçmişte olduğu gibi günümüzde de en çok inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları arasında duvarlarda kaplama, yerlerde döşeme, yaya yollarında, park ve bahçelerde kaldırım, bordür ve parke taşı sayılabilir. Bunun yanı sıra merdiven basamakları, istinat duvarları, çeşitli profiller (harpuşta, takoz), tarihi binaların restorasyonu ve kent mobilyaları (oturma grupları, çiçeklik) olarak kullanılmaktadır. Andezitler homojen ve solmayan renkleri ile cilasız, silinmiş, çekiçlenmiş veya kaba yontulmuş yüzey biçimleri ile son yıllarda yurtiçi ve yurtdışı doğal taş kullanıcılarının tercihi olmuştur (MTA, 2017).

Anadolu medeniyetlerinde yaygın olarak kullanılan ve günümüzde de birçok alanda kullanıldığı görülen andezitler, kullanım yeri ve özelliklerine bağlı olarak çevresel faktörlerin etkisiyle zamanla ayrışmaya başlarlar. Ayrışmaya etki eden faktörler fiziksel, kimyasal veya biyolojik kökenli olabilmektedir. Ayrışmayı hızlandıran en önemli etkenlerden birisi su olup her üç ayrışma türünde de önemli rol oynamaktadır. Gözenek ve çatlaklara giren sular donma-çözülme yoluyla fiziksel ayrışmayı sağlarken çözünebilir tuzları da taşıyarak gözeneklerde buharlaşma yoluyla tuz kristallenmesine neden olurlar. Böylelikle donma-çözülme etkileri yanı sıra tuz kristallenmesi nedeni ile yapılarda kullanılan doğal taşlar zaman içinde çevresel etkiler nedeni ile erozyona uğrayarak ciddi oranda zarar görmektedir. Bu hasarların giderilmesi amacıyla doğal taşların bünyesine su giri-

şinin engellenmesi gerekmektedir. Özellikle tarihi yapılarda suların doğal taşlar içerisine girmesini engellemek için koruyucu ve su itici kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Böylece su ve suda çözülmüş zararlı tuzların doğal taşların içerisine girmesi engellenerek olabilecek zararlı etkileri bertaraf edilmiş olur.

Korunması gereken bir tarihi yapının bozulma durumunun incelenmesi, nedenlerin tespit edilmesi ve buna uygun müdahale yönteminin geliştirilmesi gerekmektedir. Kısmen ayrışmaya başlamış yapı malzemesinin değiştirilmesi yerine güçlendirilerek ömrünün uzatılması restorasyon çalışmasının bir gereğidir. Bu amaçla doğal yapı taşlarının yüzey koruyucu kimyasal maddeler kullanılarak su emme miktarının azaltılması yönünde çalışmalar yapılması gerekmektedir. Koruyucu malzeme kullanım metodları temelde aynı olmakla birlikte, farklı koruyucu malzeme farklı yapı taşları üzerinde denendiğinde değişik sonuçlar verebilmektedir. Bu nedenle öncelikle laboratuvar ortamında denenmesi büyük önem taşımaktadır. Literatürde bu amaçla yapılmış çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Ioannou, 2008; Kılıç ve Gültekin, 2009; Thomachot-Schneider vd., 2011; Pinna vd., 2011; Licchelli, 2013; Pérez vd., 2014; Tulliani vd., 2014).

Literatürde, İscehisar andeziti ile ilgili bazı çalışmalara rastlanmaktadır. Bu çalışmalar andezitlerin yapı taşı olarak (Kuşçu vd., 2003; Kuşçu vd., 2006) ve agrega olarak kullanımı (Akbulut vd., 2006) hakkındadır. Doğal yapı taşlarının tuz kristallenmesine dirençlerini konu alan çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, İscehisar andezitinin tuz kristallenmesine dirençlerini konu alan bir çalışmaya rastlanmamıştır (Sperling ve Cooke, 1985; Ruiz-Agudo vd., 2007; Angeli vd., 2008; Angeli vd., 2010; Beck ve Al-Muhtar, 2010; Shahidzadeh-Bonn vd., 2010; Vázquez vd., 2013, Ca'rdenes vd., 2014).

Andezitlerin tuz kristallenmesine dirençlerini konu alan bazı çalışmalar bulunmaktadır. Ünal vd., (2006) farklı oluşumlara sahip doğal yapı taşlarının tuz kristallenmesine bağlı bozulma özellikleri ultrasonik hız ölçümleri ve ağırlık kaybı hesaplaması ile belirlemeye çalışmışlardır. Deneyler sonucunda andezitin en az bozunduğunu belirlemişlerdir. Zedef vd., (2007) Konya yöresinde tarihi yapılarda kullanılan dasit, andezit ve tüflerin tuz kristallenmesine dirençlerini kuru ağırlık kayıplarıyla bulmaya çalışmışlardır. Deneyler

sonucunda en dayanıklı kayacın dasit olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada andezitlerin tuz kristallenmesine direncini değerlendirmek için laboratuvarda sodyum sülfat çözeltileri ile yaşlandırma deneyleri yapılmıştır. Ayrışmanın etkisini azaltmak amacıyla su itici kimyasal madde sürülen numunelerle deneyler tekrar edilmiştir. Andezitlerde tuz kristallenmesi sonrası ayrışma özellikleri ağırlık kaybı, tek eksenli basınç dayanımı ve ultrasonik hız ölçümleri ile belirlenmiştir. Özellikle tarihi yapılarda kullanılan andezitlerde tuz kristallenmesi nedeniyle meydana gelen tahribatin miktarı ve derecesi bu çalışma yoluyla belirlenecek ve yörede yeni yapılarda kullanılacak olan andezitlerin de tuz kristallenmesine dirençleri hakkında veri elde edilmiş olacaktır.

## 1. MALZEME VE YÖNTEM

### 1.1. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan andezit numuneleri, İscehisar kuzeyinde yer alan Ağın dağı andezit ocaklarından temin edilmiştir. Söz konusu ocaklar aktif olup üretilen andezitler, bölgede yapıtaşı olarak kullanılmaktadır. Andezitler pembemsi, grimsi, morumsu renkler sunarlar.

Tuz kristallenme deneylerinde sodyum sülfat dekahidrat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) tuzu kullanılmıştır. TS EN 12370 standardına göre hazırlanan çözelti ağırlıkça %14'lük olup, 100 g çözeltilerde 14 g tuz, 86 g saf su kullanılmıştır. Laboratuvar deneylerinde kullanılan numuneler (5x5x5 cm), Afyon Meslek Yüksek Okulu Mermer Teknolojisi atölyesinde hazırlanmıştır. Su itici kimyasal madde olarak Teknosil marka şeffaf, siloksan esaslı, solvent bazlı ticari kimyasal madde kullanılmıştır. Su itici kimyasal madde; numuneler yıkanıp kurutulduktan sonra yüzeyine fırça ile bir kat olarak uygulanmıştır. Numuneler, polimerizasyon işlemini sağlaması için 36 saat bekletildikten sonra deneylerde kullanılmıştır.

### 1.2. Yöntem

Deneylerde kullanılan İscehisar andezitlerinin malzeme karakterizasyonu için; kimyasal analizlerin yanı sıra mineralojik-petrografik özellikleri belirlemek amacıyla polarizan mikroskop, XRD analizleri yapılmıştır. Kimyasal analiz-

ler, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği bölümü Doğal Taş Analiz Laboratuvarında bulunan Rigaku/ZSX Primus II marka XRF cihazında yapılmıştır. Petrografik incelemeleri için ince kesitler hazırlanmış ve polarizan mikroskop incelemeleri, Nikon Eclipse 2V100POL model polarizan mikroskop ile dokusu ve mineralojik bileşimi açısından incelenmiştir. XRD analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında, Bakır (Cu) X ışını tüpü kullanılarak Shimadzu marka XRD-6000 model cihaz ile yapılmıştır. SEM analizleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile yapılmıştır. Andezit numunelerinin gözenek çap dağılımları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) cıvalı porozimetre Micromeritics Auto Pore IV 9500 cihazında belirlenmiştir. Deney şartları 480,00 erg/cm<sup>2</sup> vakum altında 140 °C kontak açısı şeklindedir.

Kimyasal, XRD ve gözenek çap dağılımı için 1'er, SEM analizi için 4 adet andezit numunesi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan andezitlerin yoğunluk, su emme, gözeneklilik, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı gibi özelliklerinin belirlenmesi amacıyla fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Yoğunluk deneyinde 5, diğer fiziko-mekanik deneylerde ve tuz kristalizasyonu deneylerinde 12'şer adet 50x50x50 mm boyutlarında numuneler kullanılmıştır.

#### 1.2.1. Tuz Kristalizasyonu Deneyi

Andezitlerin tuzlu çözeltilerle yaşlandırma deneylerinde, numuneler önceden hazırlanmış bir kap içerisinde birbirleri arasında en az 10 mm ve kapla aralarında en az 20 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler, ıslatılmaları amacıyla (20±0,5) °C da 2 saat çözelti içerisinde bırakılmıştır. Bekleme süresi sonrası numuneler çözeltilerden alınmış ve bir etüvde kurutulmuştur. Etüv, kurutmanın ilk anlarında yüksek bağıl nemlilik sağlayacak şekilde ve numunelerin sıcaklığını 10 saatten az 15 saatten fazla olmayan bir süre içerisinde (105±5) °C'a yükseltecek şekilde ayarlanmıştır. Numuneler en az 16 saat süreyle etüvde bırakılmış ve yeniden soğuk sodyum sülfat çözeltisine daldırılmadan önce (2,0±0,5) saat oda sıcaklığına soğutulmuştur. İşlem numunenin dağılma parçalanma gibi durumları hariç 15 kez tekrar edilmiştir.

Deney sonunda ağırlık kayıpları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

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

Burada;

$\Delta M$ : Deney öncesi ve sonrası kütlelerdeki bağıl fark (kütle kaybı veya kütle artışı); %

$M_f$ : On beşinci işlemde sonra etiketle birlikte kuru deney numunesinin kütlesi; g

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

$M_d$ : Kuru deney numunesinin kütlesi; g

Hem normal hem de su itici kimyasal madde sü-rülmüş andezit numunelerinde tuz kristallenmesi sonrası ayrışma özellikleri ağırlık kaybı, tek eksenli basınç dayanımı ve ultrasonik hız ölçümleri ile belirlenmiştir.

## 2. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 2.1. Kimyasal Analiz

Andezitlerin oksit bileşiklerini ve buna bağlı olarak da kökenlerini belirlemek amacıyla yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1’de verilmiştir. Andezitin ana element oksit analizi sonuçlarına göre en büyük bileşen  $SiO_2$ ’dir. Andezitin  $SiO_2$  oranı %56,70 olarak belirlenmiştir. İkinci en büyük kimyasal bileşen  $Al_2O_3$  oranı %16,10’dır.  $Na_2O$  ve  $K_2O$  alkali element bileşikleri sırasıyla %2,80 ve %7,09 olarak belirlenmiştir. Kimyasal analiz verilerine göre, andezitin kökenini bulmak amacıyla Le Bas vd, (1992) tarafından önerilen toplam alkali ( $Na_2O+K_2O$ ) ve silis ( $SiO_2$ ) diyagramı kullanılmıştır. Bu verilere göre andezitin traki-andezitik bileşimli oldukları belirlenmiştir (Şekil 1).

### 2.2. Petrografik ve Mineralojik Analizler

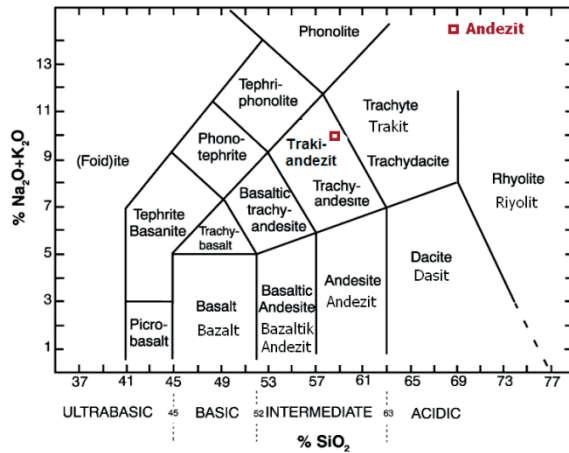
Petrografik tanımlama için üç adet andezit numunesinden ince kesitler hazırlanmış ve Polarizan mikroskop altında mineral tanımlamaları yapılmıştır. Elde edilen görüntüler Foto 1’de verilmiştir. Yapılan incelemelerde, andezitlerin porfirik dokulu olduğu belirlenmiştir. Matris genellikle mikro plajiyoklas ve piroksen minerallerinden oluşmuş olup az miktarda volkan camı görülmektedir.

Fenokristal olarak feldispat (oligoklas, sanidin), piroksen, amfibol ve biyotit mineralleri gözlen-

miştir. Piroksen minerallerinde kırık ve çatlaklar çok belirgindir. İnce kesitlerde bol miktarda gözlekler de bulunmaktadır. Andezitlerde gözlenen pembemsi-kırmızısı renk, mafik minerallerin ayrışması sonucunda oluşmuştur. Ayrışma sonucunda mafik minerallerin etrafında demiroksit sıvamaraları gözlenmektedir.

Çizelge 1. Andezitin kimyasal analiz sonucu, ana element oksit dağılımı

| Kimyasal bileşim | (%)   |
|------------------|-------|
| $SiO_2$          | 56,70 |
| $Al_2O_3$        | 16,10 |
| $Fe_2O_3$        | 5,39  |
| MgO              | 2,10  |
| CaO              | 5,40  |
| $Na_2O$          | 2,80  |
| $K_2O$           | 7,09  |
| $TiO_2$          | 1,19  |
| $P_2O_5$         | 1,00  |
| SrO              | 0,13  |
| A.Z              | 1,47  |
| Toplam           | 99,37 |



Şekil 1. Deneylerde kullanılan andezitin Le Bas vd, (1992) diyagramına (toplam alkali içeriğine karşı silis) göre kökeni traki-andezitik olarak belirlenmiştir

### 2.3. XRD Analizi

İncelenen andezit numunelerinin XRD analiz sonucu Şekil 2’de verilmiştir. XRD analizi sonucunda andezitlerin büyük oranda K-feldispat olarak ortoklas ve sanidin, plajiyoklas olarak da andezin

minerallerinden meydana geldiği belirlenmiştir. Bunlara ek olarak tridimit, piroksen, biyotit ve montmorillonit mineralleri tespit edilmiştir. Montmorillonit varlığı ayrışmalar sonucunda kil oluşu-

munu ifade etmektedir. Yapılan analiz sonucunda andezitlerin %19,2 oranında amorf malzeme içerdiği belirlenmiştir. Bu durum mikroskop analizinde volkanik cam varlığı ile de desteklenmektedir.

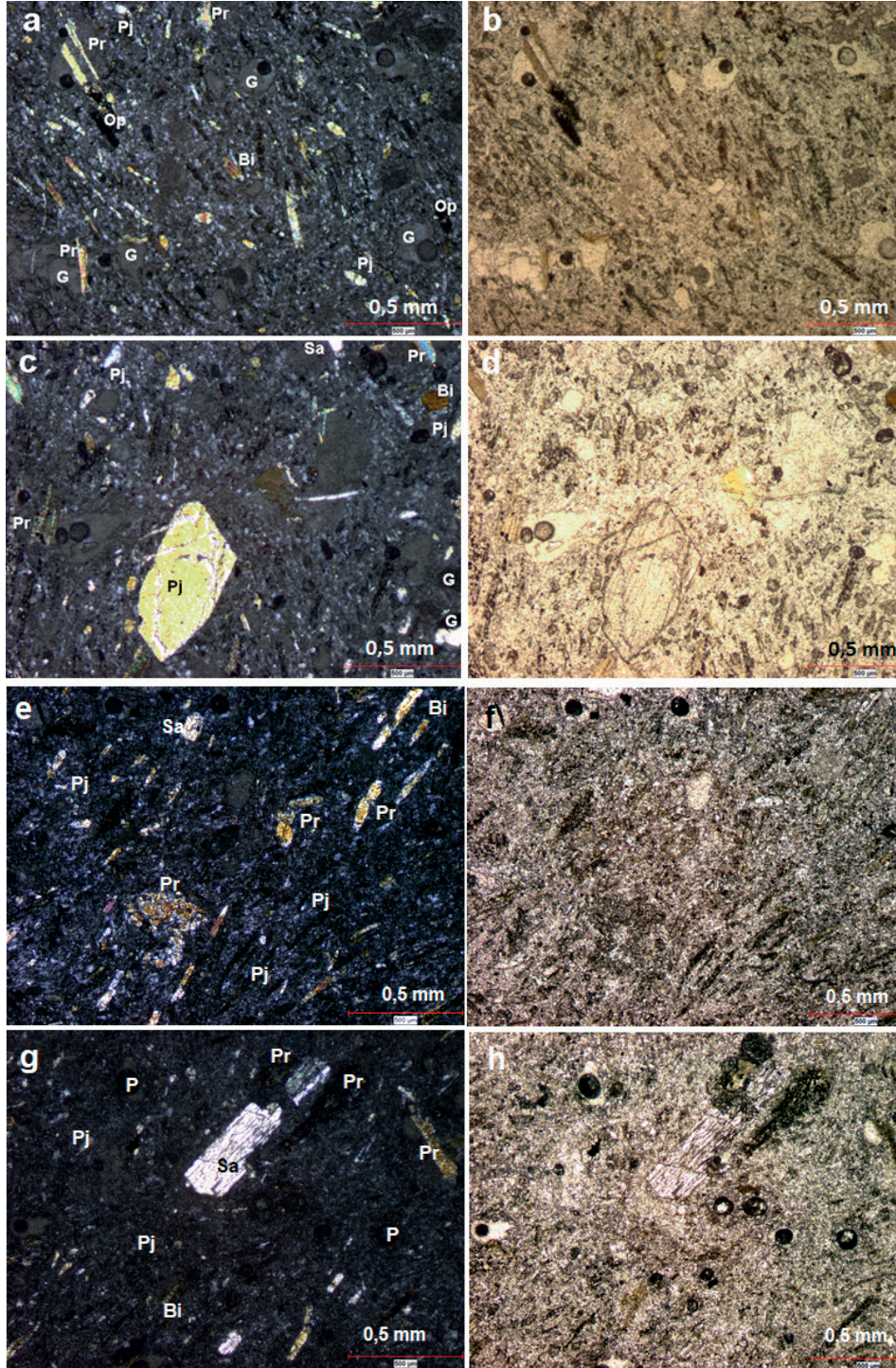
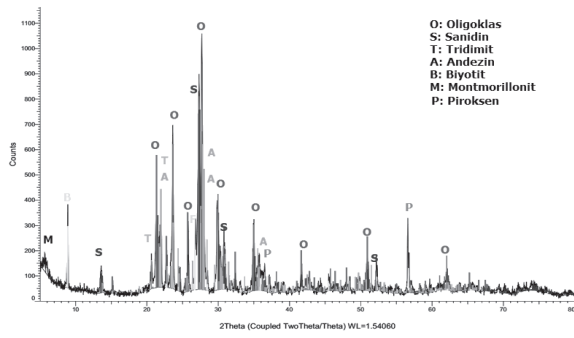


Foto 1. Andezitte ince kesit görünümleri (a, c): Çift nikol, (b, d): Tek nikol. (Pr: piroksen ve Pj: plajkioklas, Op: opak mineral, Bi: biyotit, G: gözenek)



Şekil 2. Andezitin XRD analizi sonucu elde edilen piklerin görünümü

#### 2.4. Gözenek Çapı Dağılımı

Boyutları dikkate alınarak gözenekler 3 sınıfa ayrılmıştır (Klopper, 1985):

mikro gözeneklilik (<0,1 µm),

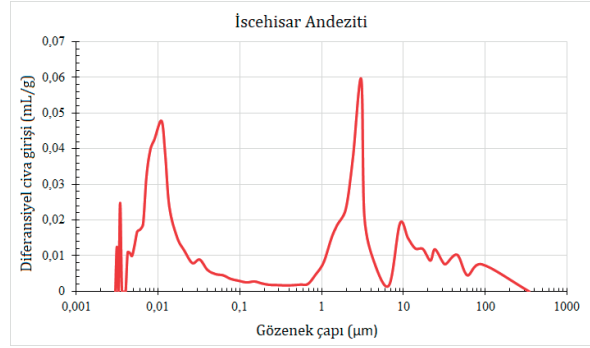
mezo gözeneklilik (kılcal gözeneklilik) (0,1 µm-1 mm),

makro gözeneklilik (>1 mm).

Kılcal su emme, pratik olarak çapları 0,1 µm ve 1 mm arasındaki gözeneklerle ilişkilidir. Kayaçların gözenek çapları küçüldükçe kılcal su emme özelliği artar. Makro gözenekler ise çapı 1 mm'den büyük olup daha çok suyun malzeme içindeki hareketini sağlarlar (Siegesmund ve Dürrast, 2011).

Deneylerde kullanılan andezitin cıvalı porozimetre yöntemiyle ölçülen gözenek çapı dağılımı grafiği Şekil 3'de verilmiştir. Gözenek çapı deneyinde civa basıncı 0,52 psi değerine ulaşmıştır. Ölçüm yapılan andezit numunesinin ortalama gözenek çapı 0,0246 µm, toplam gözenek hacmi 0,0572 mL/g olarak hesaplanmıştır.

İncelenen andezit numunesinin 0,003 –100 µm arasında gözenek çapı dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Gözeneklerin büyük bir kısmı da 0,01-3 µm aralığında yer almaktadır. Andezitin gözenek boyut dağılımı, çift doruklu (bimodal) olup 0,01-10 µm arasındadır. Birinci doruk 0,01 µm civarında iken ikinci doruk 3 µm civarında yoğunlaşmıştır. Çözünerek suyla beraber taşınabilen tuz çözeltileri daha çok kılcal kapillarite yoluyla malzeme içerisine girmektedir. Bu nedenle 0,1 µm–1 mm arasındaki gözenek dağılımı büyük önem taşımaktadır. Gözenek çapı dağılımının bu değerler arasında olduğu göz önüne alındığında andezitin tuz çözeltilerini infiltre edebilecek miktarda küçük gözenek çapı dağılımına sahip oldu-



Şekil 3. Andezitin cıvalı porozimetre yöntemiyle ölçülen gözenek çapı dağılım grafiği

#### 2.5. Fiziko Mekanik Özellikler

Doğal yapı taşlarının fiziko-mekanik özellikleri gerek mühendislik uygulamalarında gerekse de kullanım yerlerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Özellikle dış mekanlarda kullanılacak olan doğal yapıtaşlarının gözeneklilik, su emme gibi bazı fiziksel özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerinin de bilinmesi büyük önem taşımaktadır. İncehisar andezitlerinden alınan numunelerin bazı fiziksel ve mekanik değerleri belirlenmiştir. Deneylere ait standartlar, elde edilen sonuçlar ve kullanılan numunelere ait veriler Çizelge 2'de verilmiştir.

Doğal yapıtaşlarının gözeneklilik, su emme ve yoğunluk gibi özellikleri mekanik dayanımları ile doğrudan ilişkilidir. Düşük yoğunluklu ve yüksek gözenekli kayaçların genellikle daha düşük mekanik özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Deneysel verilere göre andezitlerin gerçek yoğunluğu 2.782 kg/m<sup>3</sup> iken görünür yoğunluğu 2.231 kg/m<sup>3</sup>, açık gözeneklilik %4,74 iken toplam gözeneklilik %19,73 olarak tespit edilmiştir. Doğal yapı taşlarında yüksek gözeneklilik bazı fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilerken, ısı ve ses izolasyonunu olumlu etkilemektedir. Yoğunluk ve gözeneklilik, genellikle yapı taşlarının dayanımını etkilemektedir. Düşük yoğunluklu ve gözenekli kayaçlar genellikle düşük dayanımlıdır. Gözeneklilik, geçirimsizlik ve su emme için önemli faktörlerden birisidir. Dolayısıyla yüksek gözeneklilik doğal olarak yüksek su emmeye neden olur (Guruprasad, vd. 2012). Yapı taşları bünyesindeki gözeneklerde bulunan hava izolasyon konusunda büyük önem taşımaktadır. Erdoğan vd. (2008), yapı taşlarında ses yalıtım değerleri ile birim hacim ağırlığı ve tek eksenli basınç dayanımları arasında lineer bir ilişki olduğunu ve yük-

Çizelge 2. Andezitlerin standartlara göre yapılan fiziko-mekanik deneylerine ait veriler

| Deneyler   | İlgili standart | Numune sayısı | Ortalama | Standart sapma |
|--|-----------------|---------------|----------|----------------|
| Yoğunluk (gerçek) (kg/m <sup>3</sup> )           | ASTM D 5550-06  | 5             | 2782,00  | 4,00           |
| Ağırlıkça su emme (%)                            | TS EN 13755     | 12            | 2,44     | 0,37           |
| Açık gözeneklilik (%)                            | TS EN 1936      | 12            | 4,74     | 1,17           |
| Toplam gözeneklilik (%)                          | TS EN 1936      | 12            | 19,73    | 1,69           |
| Ultras ses dalgası hızı (km/s)                   | TS EN 14579     | 12            | 4,16     | 0,14           |
| Eğilme dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )             | TS EN 12372     | 12            | 14,87    | 2,16           |
| Tek eksenli basınç dayanımı (N/mm <sup>2</sup> ) | TS EN 1926      | 12            | 70,00    | 17,00          |

sek dayanımlı kayaçların daha iyi ses izolasyonu sağladığını belirtmişlerdir.

3 nokta eğilme dayanımı 14,87 N/mm<sup>2</sup> iken tek eksenli basınç dayanımı da 70,00 N/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Tek eksenli basınç dayanımı verileri 53,05 ile 105,61 N/mm<sup>2</sup> arasında geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu çalışmada izotropinin etkisi incelenmemiş olup bu durumun numunelerin içerisinde bulunabilen mikro fissürlerden kaynaklanmış olabileceği değerlendirilmektedir.

## 2.6. Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini Deneyleri

Doğal yapı taşlarının gözeneklilik değerlerine bağlı olarak su emme değerleri de değişmektedir. Özellikle tarihi yapılarda su emmeye bağlı olarak donma çözülme ve tuz kristallenmesi nedeniyle ayrışmalar görülmektedir. Tarihi yapılardaki gözenekli yapı taşlarının ayrışmasında en etkili olanlarından biri tuz kristalizasyonu ile ortaya çıkan hasarlardır. Doğal yapı taşlarının ayrışmasında tuz kristalizasyonunun etkisini incelemek amacıyla laboratuvar tuz kristallenmesi deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde sodyum sülfat dekahidrat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10H<sub>2</sub>O), sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), potasyum klorür (KCl) gibi tuzlar kullanılmaktadır (Amoroso ve Fassina, 1983; Winkler, 1996).

Deneyde kullanılan sodyum sülfat dekahidrat (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10H<sub>2</sub>O), sıcaklık ve nem koşullarına bağlı olarak hem mirabilit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10H<sub>2</sub>O) hem de tenardit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) olarak kristallenebilmektedir (Flatt, 2002; Benavente vd., 1999). Sodyum sülfat, yüksek nemli ortamlarda mirabilit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10H<sub>2</sub>O), düşük nemde tenardit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) oluştur-

mak üzere kristallenmektedir (Flatt, 2002). Mirabilitin dehidratasyonu ile de tenardit (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) oluşmaktadır. Sodyum sülfat, susuz fazdan (tenardit) dekahidrat formuna (mirabilit) geçişi sırasında genişleme (mol hacminde 4,15 kat artış) özelliğine sahip olduğu için en zararlı tuzlardan birisi olarak tanımlanmaktadır (Doehne, 1994).

TS EN 12370'e göre açık gözenekliliği %5'den fazla olan doğal yapı taşlarını bu deney uygulanmalıdır. Test edilen andezitlerin açık gözenekliliği de %19,73 olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında da tuz kristallerinin su itici kimyasal madde uygulanmış ve uygulanmamış andezitlerde ayrışma etkisini belirlemek amacıyla sodyum sülfat çözeltileri kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır.

### 2.6.1. Su itici kimyasal madde uygulanmamış numunelerin tuz kristalizasyonu deneyleri

TS EN 12370'e göre yapılan tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, 5x5x5 cm küp şeklindeki su itici kimyasal madde uygulanmamış İncehisar andezit numunelerinde 15 çevrim sonunda kuru kütle değişimi verileri Çizelge 3'de verilmiştir. Su itici kimyasal madde uygulanmamış (normal) andezit numunelerinin kuru kütle kaybı ortalama %0,3695 olarak bulunmuştur. Su itici kimyasal madde uygulanmamış andezit numunelerinin 1, 5, 10 ve 15. çevrimler sonrasında görünümü Foto 2'de verilmiştir. Su itici kimyasal madde uygulanmamış andezit numunelerinin tuz kristalizasyonu deneyleri sonrasında herhangi bir ayrışma ve çatlak oluşumuna rastlanmamıştır. Ancak çok küçük kırıntılar şeklinde ayrışmalar gözlenmiştir. Bu durumun numunelerde kütle bütünlüğünün bozulmasına yol açmadığı görülmüştür.

### 2.6.2. Su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerin tuz kristalizasyonu deneyleri

TS EN 12370'e göre yapılan tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, 5x5x5 cm küp şeklinde-

ki numunelere su itici kimyasal madde uygulanmış İncehisar andezit numunelerinde 15 çevrim sonunda kuru kütle değişimi verileri Çizelge 4'de verilmiştir.

Çizelge 3. Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, su itici kimyasal madde uygulanmamış andezit numunelerinde Eşitlik 1 kullanılarak elde edilen veriler

|    | Kuru ağırlık (Md) (gr) | Tel bağlı numune ağırlığı (Md1) (gr) | 15. Çevrim sonrası ağırlık (Mf) (gr) | Kuru kütle kaybı (%) | Ortalama (%) | Standart sapma |
|----|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------|----------------|
| 1  | 271,84                 | 272,85                               | 271,96                               | 0,3274               |              |                |
| 2  | 270,81                 | 271,68                               | 270,60                               | 0,3988               |              |                |
| 3  | 261,98                 | 262,91                               | 262,03                               | 0,3359               |              |                |
| 4  | 269,86                 | 270,65                               | 269,50                               | 0,4261               |              |                |
| 5  | 269,32                 | 270,36                               | 269,29                               | 0,3973               |              |                |
| 6  | 272,03                 | 272,94                               | 271,75                               | 0,4375               | 0,3695       | 0,0623         |
| 7  | 275,68                 | 276,56                               | 275,40                               | 0,4208               |              |                |
| 8  | 281,69                 | 282,79                               | 281,75                               | 0,3692               |              |                |
| 9  | 263,62                 | 264,64                               | 263,79                               | 0,3224               |              |                |
| 10 | 276,59                 | 277,49                               | 276,70                               | 0,2856               |              |                |
| 11 | 264,16                 | 265,13                               | 264,44                               | 0,2612               |              |                |
| 12 | 277,06                 | 277,98                               | 276,73                               | 0,4512               |              |                |



1. çevrim



5. çevrim



10. çevrim



15. çevrim

Foto 2. Su itici kimyasal madde uygulanmamış andezit numunelerinin 1, 5, 10 ve 15. çevrimler sonrasında görünümü

Su itici kimyasal madde uygulanmış andezit numunelerinin kuru kütle artışı ortalama %0,1859 olarak bulunmuştur. Bu durum, su itici kimyasal maddenin numunelerin içerisine tam olarak infiltrate olamadığı yerlerdeki açıklıklardan, içerisine az oranda girmiş olan tuz kristallerinden kaynaklanmaktadır. Bazı numunelerde ise tuz kristallenmesinin ayrıştırma etkisinden dolayı kütle kaybı meydana gelmiştir. Kütle artış oranının ihmal edile-

lebilecek oranda artış göstermesi ve kütle kaybı olmamasından dolayı koruma işleminin başarılı olduğu şeklinde yorumlanabilir. Su itici kimyasal madde uygulanmış andezit numunelerinin 1, 5, 10 ve 15. çevrim sonrasında görünümü Foto 3'de verilmiştir. Su itici kimyasal madde uygulanmış andezit numunelerinin tuz kristalizasyonu deneyleri sonrasında herhangi bir ayrışma ve çatlak oluşumuna rastlanmamıştır.

Çizelge 4. Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, su itici kimyasal madde uygulanmış andezit numunelerinde Eşitlik 1 kullanılarak elde edilen veriler

| Numune kodu | Kuru ağırlık (Md) (gr) | Tel bağlı numune ağırlığı (Md1) (gr) | 15. Çevrim sonrası ağırlık (Mf) (gr) | Kuru kütle kaybı (%) | Kuru kütle artışı (%) | Ortalama (%) | Standart sapma |
|-------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| 1           | 267,84                 | 269,69                               | 271,26                               | -                    | 0,5862                |              |                |
| 2           | 273,84                 | 275,38                               | 276,87                               | -                    | 0,5441                |              |                |
| 3           | 275,18                 | 276,74                               | 276,59                               | 0,0545               | -                     |              |                |
| 4           | 274,84                 | 276,62                               | 276,09                               | 0,1928               | -                     |              |                |
| 5           | 283,40                 | 284,85                               | 284,67                               | 0,0635               | -                     |              |                |
| 6           | 266,75                 | 268,45                               | 269,55                               | -                    | 0,4124                | 0,1859       | 0,3158         |
| 7           | 285,28                 | 287,68                               | 287,66                               | 0,0070               | -                     |              |                |
| 8           | 273,31                 | 274,57                               | 274,46                               | 0,0402               | -                     |              |                |
| 9           | 276,18                 | 267,75                               | 269,02                               | -                    | 0,4598                |              |                |
| 10          | 275,77                 | 277,52                               | 277,76                               | -                    | 0,0870                |              |                |
| 11          | 263,60                 | 265,41                               | 267,11                               | -                    | 0,6449                |              |                |
| 12          | 274,84                 | 276,48                               | 276,08                               | 0,1455               | -                     |              |                |



1. çevrim



5. çevrim



10. çevrim



15. çevrim

Foto 3. Su itici kimyasal madde uygulanmış andezit numunelerinin 1, 5, 10 ve 15. çevrimler sonrasında görünümü

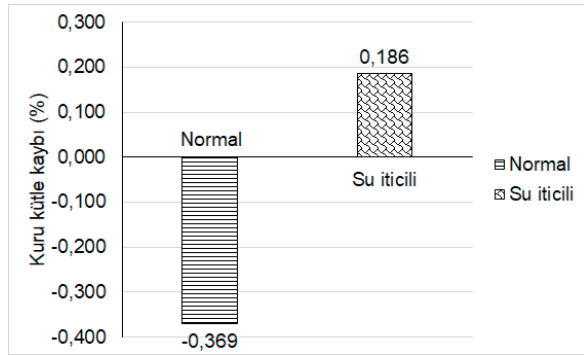


## 2.7. Tuz Kristallenmesi Deneyleri Sonrası Meydana Gelen Değişikliklerin İncelenmesi

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, 15 çevrim sonunda İschehisar andezitinde meydana gelen yapısal değişiklikleri incelemek amacıyla kuru kütle ağırlığı değişimi yanı sıra, ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

### 2.7.1. Kuru kütle ağırlığı değişimi

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde, 15 çevrim sonunda numunelerin Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanan kuru kütle ağırlığı değişimleri Şekil 4'de verilmiştir. Su itici kimyasal madde sürülmemiş normal numunelerde ortalama %0,3695 kuru kütle kaybı ölçülmüşken, su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise ortalama %0,186 kütle artışı ölçülmüştür.



Şekil 4. Tuz kristallenmesine direncin tayini sonrası, su itici kimyasal madde uygulanmış ve uygulanmamış andezit numunelerinde 15 çevrim sonunda meydana gelen kuru kütle ağırlığı değişiklikleri

Tuz kristallenmesi deneyleri sırasında andezit numuneleri yaklaşık 2 saat tuz çözeltisinde bekletilmekte ve sonra numuneler 105 °C'deki fırında kurumaya bırakılmaktadır. Çözelti içerisinde gözenekler tuz çözeltisi ile doymun hale gelmekte, fırında ise suyun buharlaşması ile çözeltideki tuzlar gözeneklerde kristallenmektedir. İlerleyen çevrimlerde ise yeniden tuz çözeltileri ortamda birikerek ikincil kristallenmeler meydana getirmektedir. Bu olaylar sırasında oluşan kristal yapısındaki hacim artışı gözenek duvarlarına belirli bir basınç uygulamaktadır. Çevrimsel olarak tekrarlanan bu basınç artışı taşların

yapısını zayıflatmakta ve belirli bir süre sonra taş içerisinde öncelikle kılcal çatlaklar oluşturmaktadır. Bu mikro çatlaklar ilerleyen çevrimlerde daha da genişleyerek taş malzemede tane kayıplarına yol açmaktadır. Deneysel verilere göre İschehisar andezitlerinin çok gözenekli bir yapısı olmasına karşılık tuz kristallenmesine karşı dayanıklı olduğu söylenebilir. Bu durum andezitlerin toplam gözenekliliğinin %19,73 olmasına karşılık, su emme miktarının %2,44 olması nedeniyle çok fazla tuz kristali absorbe etmemesinden kaynaklanmaktadır. Gözeneklerde biriken tuz kristalleri, fazla büyümemesinden dolayı yeterli iç basınç üretememiştir. Bu nedenle numunelerde ilerleyen çevrimlerde tuz kristallenmesi basınçlarına bağlı olarak herhangi bir çatlak gözlenmemiş olup hiçbir numune ilksel bütünlüğünü kaybetmemiştir. Numunelerde kısmen az miktarda renk solmaları gözlenmiştir.

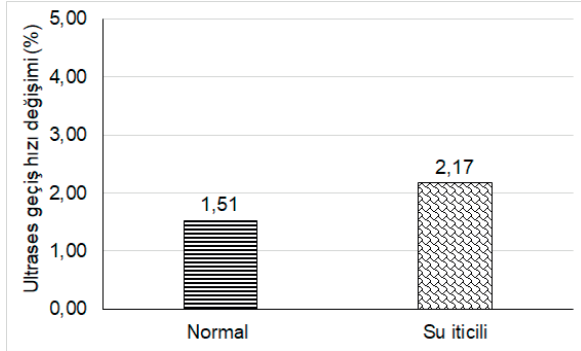
Kütle artışının sebebi, numunelerin gözeneklerinin tuzlu su çözeltisi ile doymun hale gelmesi ve kurutma aşamasında suyun buharlaşması ile çözeltideki tuzların gözeneklerde kristallenmesidir. Su itici kimyasal madde sürülen numunelerde elde edilen kütle artışının çok küçük olması ve kütle kaybı olmaması, su itici kimyasal maddenin su itici özelliğinden kaynaklanmaktadır. Su itici kimyasal madde, yüzeyde gözenekleri kapatarak malzeme yüzeyini hidrofob (suyu itici) hale getirmiştir. Ancak ilerleyen deney çevrimlerinde bazı çatlak oluşumları az da olsa kimyasal maddenin stabilitesini bozarak az miktarda su emilimi sağlayabilmektedir.

### 2.7.2. Ultrases dalga hızı değişimi

Andezit numunelerinin 15 çevrim sonunda tuz kristallenmesinden nasıl etkilendiklerinin belirlenmesinde P dalgası hızı ölçümlerinden yararlanılmıştır. P dalgası hızı ölçüm sonuçları değişimi Şekil 5'de verilmiştir.

Tuz kristallenmesine direncin tayini deneyinde her iki (su itici kimyasal uygulanmamış ve uygulanmış) andezit numuneleri grubunda da başlangıç aşamasında P dalgası hızı açısından önemli bir fark gözlenmemiştir. Başlangıçta ultrases dalga hızı ölçümleri ortalama 4,15 ve 4,16 km/s olarak ölçülmüştür. 15 çevrim sonrasında P dalgası hızlarında normal andezitlerde %1,56, su itici kimyasal uygulanmış andezitlerde ise %2,17 oranında

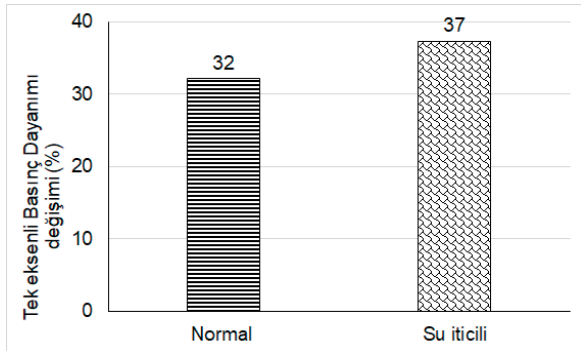
artış belirlenmiştir. Bu da kuru kütle ağırlık değişiminin %1'in altında kalması ile uyumludur. Andezit örneklerinin çok fazla ayrışmaması ve bazı gözeneklerde tuz kristalleri birikmesi nedeniyle bu artış meydana gelmiştir. Su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise kimyasal maddenin yüzeyden itibaren içeri penetrasyon yapmasından dolayı gözeneklerin dolması ve daha homojen bir ortam oluşması olarak açıklanabilir.



Şekil 5. Tuz kristallenmesine direncin tayini sonrası, su itici kimyasal madde uygulanmış ve uygulanmamış andezit numunelerinde meydana gelen ultra ses geçiş hızı değişiklikleri

### 2.7.3. Tek eksenli basınç dayanımı değişimi

15 çevrim sonunda numuneler üzerinde gerçekleştirilen tek eksenli basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre; her iki grupta da düzenli bir dayanım azalması saptanmıştır. Sodyum sülfat çözeltisinde numunelerin 15 çevrim sonunda ölçülen tek eksenli basınç dayanımı değerleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Tuz kristallenmesine direncin tayini sonrası, su itici kimyasal madde uygulanmış ve uygulanmamış andezit numunelerinde meydana gelen tek eksenli basınç dayanımı değişiklikleri

Tek eksenli basınç dayanımı değerleri, taze andezit numunelerinde ortalama 70 N/mm<sup>2</sup>, su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise ortalama 92 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Tuz kristallenmesi deneyinde, 15 çevrim sonunda taze numunelerin basınç dayanımı değerlerinde %32, su itici kimyasal uygulanmış numunelerde ise %37 azalma ölçülmüştür.

Sodyum sülfat kristallerinin mol hacimleri susuz fazdan (tenardit) dekahidrat formuna (mirabilit) geçiş sırasında artış göstermektedir. Dolayısıyla deney sırasında boşluklarda defalarca meydana gelen bu değişimler mikro çatlaklar oluşturmaktadır. Bu mikro çatlaklardan dolayı numunelerin basınç dayanımında azalmalar meydana gelmiştir. Deney çevrimlerinin daha fazla olmasına bağlı olarak yapı taşı bünyesinde kaçınılmaz olarak mikro çatlaklar meydana gelebilecektir.

### 2.7.4. Tuz kristallenmesi etkisinin sem (taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmesi

Doğal taşların önemli ayrışma mekanizmalarından birisi olan tuz kristallerinin andezit numuneleri üzerindeki etkisi, SEM (Taramalı elektron mikroskobu) ile incelenmiştir. Tuz kristallenmesi deneyi sonrası andezit numunesi yüzeyinde sülfat kristalleri gözlenmiştir (Foto 4a).

SEM analizinde, sodyum sülfat bileşimli mineraller kısa prizmatik, agregatlar şeklinde ve uzun yassı levhamsı, mızrak kümeleri şekilli kristaller halinde gözlenmiştir.

Su itici kimyasal madde uygulanmış numunesinin yüzey görünümü de Foto 4b'de verilmiştir. Bu numunelerin yüzeyinde normal andezit numunelerinden çok daha az oranda sülfat kristallerine rastlanmıştır. Bu durum su itici kimyasal maddenin yüzeyi hidrofobik hale getirmesi nedeniyle ilişkilidir. Bazı alanlarda su itici kimyasal maddenin stabilitesinin bozulmasından dolayı yer yer çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklardan da az miktarda da olsa tuzlu su, numune içerisine girmiş olabilmektedir.

Sülfat minerali olduğu belirlenen alanda elemental EDX analizi yapılmıştır (Foto 4c). EDX analizi sonucunda Oksijen %54,13, sodyum %24,67 ve sülfür elementi %21,20 oranında belirlenmiş ve sülfat minerali olduğu teyit edilmiştir.

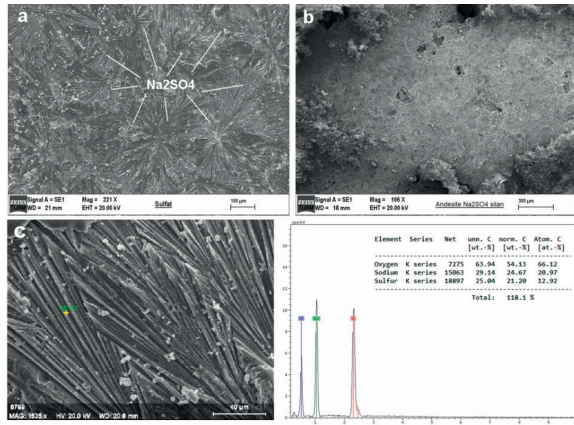


Foto 4. Tuz kristallenmesi deneyi sonrası andezit numunesi yüzeyinde oluşan sülfat kristallerinin görünümü (a), su itici kimyasal madde uygulanmış numunesinin yüzey görünümü (b) ve sülfat kristalinde belirlenen noktanın EDX elementel analiz sonucu

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal yapı taşlarının bozunmasında en önemli süreçlerden birisi tuz kristallenmesi olarak kabul edilmektedir. Yapıların bulunduğu zemindeki yer altı suları bazen çözünür tuzlar içerebilmektedir. Bu durumda kılcal su emme yoluyla bünyeye giren ve hareket ederek yükselen tuzlu sular, gözeneklerde birikerek kristallenir. Yapı taşlarının ömürlerinin uzatılması için bu suların malzeme içine girişinin önlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada andezitlerde tuz kristallenmesi nedeniyle oluşabilecek ayrışmayı belirlemek amacıyla sodyum sülfat çözeltisi kullanılarak, su itici kimyasal uygulanan ve uygulanmayan numuneler üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Tuz kristallenmesi nedeniyle özellikle tarihi yapılarda önemli tahribatlar meydana geldiği bilinmektedir. Oluşan tahribatlar restorasyon ve konservasyon yöntemleriyle bertaraf etmek amacıyla önemli çalışmalar yapmak gerekmektedir. Bu çalışmalar için tarihi yapılarda kullanılan yapı taşlarının fiziko-mekanik özelliklerinin yanı sıra gözenek boyut dağılımı ve buna bağlı olarak su emme miktarının yanı sıra tuz kristallenmesine direncinin de bilinmesi gerekmektedir. Yapılan analiz ve deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Andezitin karakterizasyon testlerinde kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler yapılmıştır. Buna göre andezitler, traki-andezit bileşimli olup

büyük oranda K-feldispat olarak ortoklas ve sanidin, plajiyoklas olarak da andezin minerallerinden meydana geldiği belirlenmiştir. Andezitin gözeneklerinin 0,01-10 µm arasında yoğunlaştığı belirlenmiştir. Andezitin gözenek boyut dağılımı, çift doruklu (bimodal) olup birinci doruk 0,01 µm civarında iken ikinci doruk 3 µm civarında yoğunlaşmıştır.

15 çevrim tuz kristallenmesi deneyleri sonrasında, su itici kimyasal madde uygulanan ve uygulanmayan numunelerin kuru ağırlık değişimleri, ultrases dalga hızı ve tek eksenli basınç dayanımları incelenmiştir.

Su itici kimyasal madde uygulanmamış normal numunelerde %0,3695 kuru kütle kaybı, su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise %0,186 kütle artışı ölçülmüştür. Bu durumda su itici kimyasal madde uygulanması durumunda andezitlerin kuru ağırlık kayıplarının azaltılabileceği belirlenmiştir.

Su itici kimyasal madde uygulanmamış normal numunelerde ultrases dalga hızları 4,15 ve 4,16 km/s olarak ölçülmüştür. 15 çevrim sonrasında P dalgası hızlarında normal andezitlerde %1,56, su itici kimyasal uygulanmış andezitlerde ise %2,17 oranında artış belirlenmiştir. Bu da andezitlerin çok fazla ayrışmadığının ve ultrases dalga hızının azalmasını sağlayan gözenek ve çatlakların tuz kristalleri veya kimyasal madde ile dolduğunun bir göstergesidir. Ayrıca kuru kütle ağırlık değişiminin %1'in altında kalması ile de uyumludur.

Su itici kimyasal madde uygulanmamış normal numunelerde, sodyum sülfat çözeltisinde 15 çevrim sonunda ölçülen tek eksenli basınç dayanımı değerleri 70 N/mm<sup>2</sup>, su itici kimyasal madde uygulanmış numunelerde ise 92 N/mm<sup>2</sup> olarak belirlenmiştir. Tuz kristallenmesi deneyinde, 15 çevrim sonunda taze numunelerin basınç dayanımı değerlerinde %32, su itici kimyasal uygulanmış numunelerde ise %37 azalma ölçülmüştür.

Yapılarda su emme ve tuz kristallenmesi kaynaklı bozulmaların önlenmesi için doğal taşların özellikleri belirlendikten sonra gerekli koruma önlemlerinin alınması gerekmektedir. Çok rutubetli ortamlarda su itici ve koruyucu kimyasal maddeler kullanılmak suretiyle doğal taşların su emme miktarının kontrol altına alınması, aynı zamanda tuz kristallenmesinden dolayı oluşacak tahribatların da azaltılmasını sağlayacaktır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince 17.MYO.02 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

Akbulut, H., Gürer, C., Yıldız, A., 2006. İncehisar Andezitlerinin Yol Üst Yapı Kırmataşı Olarak Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Türkiye IV. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, 183.

Amoroso, G. G., Fassina, V. 1983. Stone Decay and Conservation – Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1453.

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

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

ASTM D 5550-06., 2005. Gaz Piknometresiyle Özgül Kütle Tayini (Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer).

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

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

Ca'rdenes, V., Mateos. F. J., Ferná'ndez-Lorenzo, S., 2014. Analysis of the Correlations between Freeze–Thaw and Salt Crystallization Tests. Environ Earth Sci, 71, 1123–1134.

Doehne, E., 1994. In Situ Dynamics of Sodium Sulfate Hydration and Dehydration in Stone Pores: Observations at High Magnification Using the Environmental Scanning Electron Microscope.

Erdoğan, Y., Yaşar, E., Güneşli, H. 2008. Doğal Yapı Taşlarının Isı-Ses Yalıtımı ile Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. IX. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu, 340-350, İzmir.

Fassina, O. A. Z., editor, The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, (Venice, Italy): 143-150.

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

Guruprasad, B., Ragupathy, A., Badrinarayanan, T.S., Rajkumar, K.B., 2012. The Stress Impact on Mechanical Properties of Rocks in Hydro Fracturing Technique. Int J Eng Sci Tech (IJEST), 4 (2), 571-580.

Ioannou, I., Hoff, W. D., 2008. Water Repellent Influence on Salt Crystallisation in Masonry. Proc. ICE Constr. Mater, 161, 17–23.

Kılıç, İ., Gültekin, A. H., 2009. Effects of Surface Protection Resin on Water Absorption and Strength of Sandstone. 5th International Advanced Technologies Symposium, Karabuk University, 2196-2199.

Klopfer, H., 1985. Feuchte. In: Lutz P et al (eds) Lehrbuch der Bauphysik. Teubner, Stuttgart, 329–472.

Kuşcu, M., Yıldız, A., Bağcı, M., 2003. Investigation of Ağın Andesite as a Building Stone (İncehisar-Afyon, W-Turkey). International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones, 243-253, İstanbul, Turkey.

Kuşcu, M., Bağcı, M., Yıldız, A., 2006. Konarı (İncehisar-Afyon) Traki-Andezitlerinin Yapıtaşı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. MERSEM 2006' Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 281-290.

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

Licchelli, M., Malagodi, M., Weththimuni, M. L., Zanchi, C., 2013. Water-repellent Properties of Fluoro Elastomers on a Very Porous Stone. Effect of the application procedure. Progress in Organic Coatings, 76, 495–503.

- MTA, 2017. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/yapi-taslari>
- Pérez, N. A., Lima, E., Bosch, P., Méndez-Vivar, J., 2014. Consolidating Materials for the Volcanic Tuff in Western Mexico. *Journal of Cultural Heritage*, 15, 352–358.
- Pinna, D., Salvadori, B., Porcinai, S., 2011. Evaluation of the Application Conditions of Artificial Protection Treatments on Salt-Laden Limestones and Marble. *Constr Build Mater*, 25, 2723-2732.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P., Rodriguez Navarro, C., 2007. The Role of Saline Solution Properties on Porous Limestone Salt Weathering by Magnesium and Sodium Sulfates. *Environ Geol*, 52, 269–281.
- Shahidzadeh-Bonn, N., Desarnaud, J., Bertrand, F., Chateau, X., Bonn, D., 2010. Damage in Porous Media due to Salt Crystallization, *Physical Review*, E 81, 066110.
- Siegesmund S., Dürrast H., 2011. Physical and Mechanical Properties of Rocks. In: *Stone in Architecture*, 4th edition, Siegesmund S., Snethlage R. eds., Berlin: Springer, 97–225,
- Sperling, C. H. B., Cooke, R.U., 1985. Laboratory Simulation of Rock Weathering by Salt Crystallisation and Hydration Processes in Hot, Arid Environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 541-555.
- Thomachot-Schneider, C., Gommeaux, M., Fronteau, G., Oguchi, C.T., Eyssautier, S., Kartheuser, B., 2011. A Comparison of the Properties and Salt Weathering Susceptibility of Natural and Reconstituted Stones of the Orval Abbey (Belgium). *Environ. Earth Sci*, 63, 1447-1461.
- Tulliani, J. M., Serra, C. L., Sangermano, M. 2014. A Visible and Long-Wavelength Photocured Epoxy Coating for Stone Protection. *Journal of Cultural Heritage*, 15, 250–257.
- TS EN 12370, 2001. Doğal Taşlar-Deney Metotları-Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini. TSE, Ankara, 8 s.
- TS EN 1936, 2010. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Porozite Tayini. TSE, Ankara, 10 s.
- TS EN 13755, 2014. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. TSE, Ankara, 10 s.
- TS EN 14579, 2006. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Ses Hızı İlerlemesinin Tayini. TSE, Ankara, 14 s.
- TS EN 1926, 2013. Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri-Tek Eksenli Basınç Dayanımı Tayini. TSE, Ankara, 19 s.
- TS EN 12372, 2007. Doğal taşlar-Deney Yöntemleri-Yoğun Yük Altında Bükülme Dayanımı Tayini. TSE, Ankara, 17 s.
- Ünal, M., Özkan, İ., Kekeç, B., 2006. "Yapıtaşlarında Tuz Kristalleşmesine Bağlı Bozunmanın Ultrasonik Hız Ölçümleri ile Kestirimi. Mersem 2006, Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 431-437.
- Vázquez, M. A., Galán, E., Ortiz, P., Ortiz, R., 2013. Digital Image Analysis and Edx Sem as Combined Techniques to Evaluate Salt Damp on Walls. *Construction and Building Materials*, 45, 95–105.
- Winkler, E.M. 1996. Properties of Marble as Building Veneer – *International Journal of Rock Mechanics*. *Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 33, 215-218.
- Yavuz, A.B., Kaputoglu, S.A., Çolak, M., Tanyu F.B. 2017. Durability Assessments of Rare Green Andesites Widely Used as Building Stones in Buca (Izmir), Turkey. *Environ Earth Sci*, 76, 211.
- Zedef, V., Kocak, K., Doyen, A., Ozsen, H., Kekeç, B., 2007. Effect of Salt Crystallization on Stones of Historical Buildings and Monuments. *Konya*,



Orijinal Araştırma / Original Research

## BİR KIRMA ELEME TESİSİNİN PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE OPTİMİZASYONU

### PERFORMANCE EVALUATION AND OPTIMIZATION OF A CRUSHING-SCREENING PLANT

Özgür Özcan<sup>a,\*</sup> Nurettin Alper Toprak<sup>a,\*\*</sup> İbrahim Göktaş<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Geliş Tarihi / Received : 19 Aralık / December 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 2 Nisan / April 2018

#### Anahtar Sözcükler:

Kırma,  
Eleme,  
Agrega,  
Modelleme,  
Optimizasyon.

#### ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye'de yer alan bir kırma eleme devresinde performans değerlendirme ve optimizasyona yönelik detaylı örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. Performans değerlendirme çalışmalarının sonuçlarına göre devrede yer alan dik milli darbeli kırıcı ortalama boyut indirgeme değerlerinde çalışmaktadır. Ancak, devrede yer alan konik kırıcının indirgeme oranı düşüktür. Kapalı ağız açıklığının düşürülmesi konik kırıcı indirgeme oranını arttırmaktadır. Elek verimleri ise üzerine gelen malzeme miktarı arttıkça düşmektedir. Bu çalışmanın ardından devrede yer alan tüm ekipmanlar uygun model yapıları ile ayrı ayrı modellenmiştir. Model sonucu elde edilen tonaj ve tane boyu dağılımları madde denkliği sonuçları ile çok yakındır. Modelleme çalışmalarının ardından iki farklı simülasyon çalışması yürütülmüştür. İlk çalışmanın sonuçları konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesinin hem konik kırıcı indirgeme oranının hem de konik kırıcı elek grubu performansını arttırdığını göstermiştir. İkinci çalışmanın sonucunda ise devrede yer alan ince elek açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılması sonucunda ürün kalitesinde herhangi bir bozulma olmadan tesis kapasitesinin %15 arttırılabileceğini göstermiştir.

#### ABSTRACT

In this study, extensive sampling campaign was performed around the crushing-screening circuit of an aggregate plant in Turkey in order to performance evaluation and optimization. According to results of performance evaluation studies, vertical shaft impactor (VSI) is running within average reduction ratio values. But, the reduction ratio of the cone crusher was lower. Decreasing close side setting (CSS) of cone crusher increases the reduction ratio. Screen performances were decreasing by increasing feed capacity. Then, all equipment in the circuit were modelled individually by using the appropriate model structures. Model and mass balance results were very close to each other. After modelling, two different simulation studies were performed separately. As a result of first simulation study, the reduction ratio of cone crusher increases by decreasing CSS, therefore; the cone crusher screen group performance also increases. As a result of second simulation study, the plant capacity can be increased 15% by changing fine screen aperture from 5 mm to 6 mm without any deterioration in the product quality.

#### Keywords:

Crushing,  
Screening,  
Aggregate,  
Modelling,  
Optimization.

\* Sorumlu yazar: [ozgurozcan@hacettepe.edu.tr](mailto:ozgurozcan@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0001-6177-4585>

\*\* [natoprak@hacettepe.edu.tr](mailto:natoprak@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0003-0172-2198>

## GİRİŞ

Agrega, sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan konut ihtiyacını karşılamaya çalışan ve son yıllarda ülkemizin en önemli sektörlerinden biri haline gelen, inşaat sektörünün temel hammaddeleri arasındadır. Yol, altyapı malzemesi, bina inşaatları, köprü inşaatı vb. alanlarda çok yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Yılmaz vd., 2003). Agregaya; beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, geliştirilmiş perlit, geliştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir (Doğan vd., 2003).

Kırma-eleme tesisleri hem maden sektöründe üretilen cevherlerin işlendiği, hem de inşaat sektörünün ihtiyaç duyduğu kırma taş üretiminin (asfalt, beton, yol malzemesi vs.) gerçekleştirildiği elektro-mekanik tesislerdir.

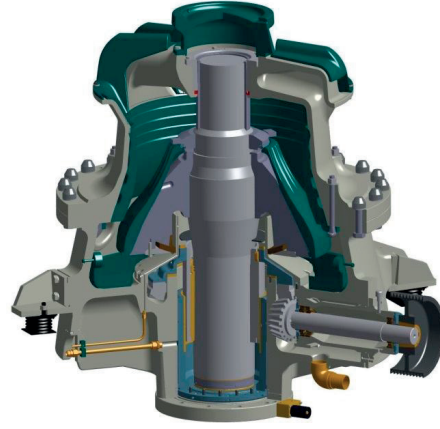
Taş ocakları veya derelerden delme-patlatma ve/veya direkt kazıcı yükleyiciler ile çıkarılarak tesise getirilen malzeme genellikle üç farklı kırma işlemine tabi tutulur. Birincil, ikincil ve üçüncül olarak adlandırılan bu kırma süreçleri sonucunda, malzeme eleklerden geçirilerek istenilen boyutlarda sınıflandırılır ve kırma taş (agrega) üretiminin son aşaması tamamlanmış olur. Elde edilen ürün yol yapımı için asfalt tesislerine, betonarme yapılar için ise beton santrallerine gönderilir.

Birincil kırıcılar; çeneli ve rotorlu kırıcılar olmak üzere iki çeşittir. Ülkemizde birincil kırıcı olarak genellikle çeneli kırıcı kullanılmaktadır (Arman, 2014).

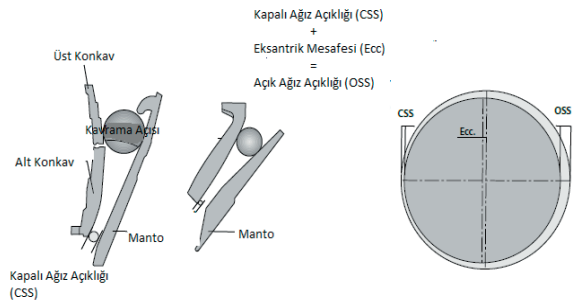
Konik kırıcılar ise granit, bazalt ve andezit gibi sert ve aşındırıcı dere ve ocak malzemelerini kırmak için tasarlanmış olup ikincil ve üçüncül kırıcı olarak kullanılmaktadır. Konik kırıcıların çalışma prensibi malzemeleri sıkıştırma, kesme ve bükme etkisiyle kırmaktır. Malzemeyi sıkıştırarak kırdıkları için düşük toz ve aşınma oranları sunmaktadır. İşletmelerde ikincil ve üçüncül kırıcı olarak kullanılan bu tip kırıcıların indirgeme oranı 3-7:1 'dir (Wills ve Napier-Munn, 2006). Konik kırıcıya ait kesit görünümü ile kırma mekanizması sırasıyla Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmektedir.

Dik milli darbeli kırıcılar kum ocakları, taş ocakları, hazır beton ve madencilik sektöründe kullanılabilen, avantajları ve maliyetleri düşük olan kırıcılardır. Üçüncül kırıcılara alternatif olarak

üretilen, orta irilikteki bazalt, granit gibi sert veya aşındırıcı her türlü malzemeyi kırarak 0-5 mm kum elde etmek için kullanılan, kum ve kübiklik oranı yüksek kırıcılardır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

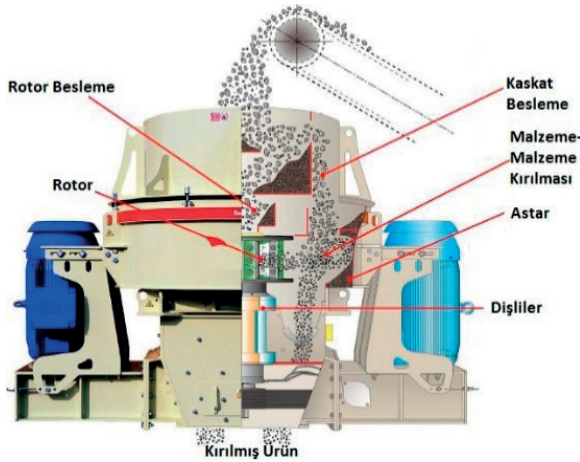


Şekil 1. Konik kırıcının kesit görünümü



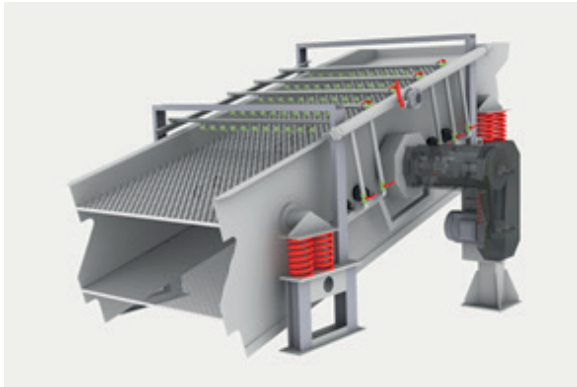
Şekil 2. Konik kırıcı kırma mekanizması

Dik milli kırıcılar diğer kırıcı tiplerinden farklı olarak, malzemeyi iki plaka arasında sıkıştırmak yerine içerisinde bulunan rotor aracılığıyla malzemeleri hızlandırarak hem birbirlerine hem de astara çarptırılması sonucu kırma işlemi gerçekleştirmektedir. Malzeme konveyör aracılığı ile kırıcının üst kısmına taşınmakta ve en üst noktada kırıcı haznesine beslenmektedir. Burada tüm malzeme iki kola ayrılmaktadır. Bir kısmı rotor haznesine doğru yol alırken (rotor besleme), diğer kısmı kırıcı kenarından (kaskat besleme) hazneye giriş yapmaktadır. Rotor haznesine gelen taneler, cidarlara doğru ivmelendirilmektedir. Kenara savrulduklarında, hem astara hem de kaskat besleme noktasından gelen diğer tanelere çarparak kırılma işlemine maruz bırakılmaktadır (Şekil 3). Bu tip kırıcıların indirgeme oranları 2:1-5:1 aralığında değişmektedir (Marcotte, 2017).



Şekil 3. Dik milli darbeli kırıcı kırma mekanizması

Kırma işleminin ardından ürün boyutundaki malzeme eleme yöntemi ile elde edilir (Şekil 4). Eleme işlemi; tanelerin belirli boyutlardaki açıklıklardan geçebilme ihtimali esasına dayanan bir sınıflandırma işlemidir. Eleme, kuru veya yaş olarak yapılabilmektedir. Kuru eleme göreceli olarak daha ucuz ve yaygın kullanılan bir yöntem olmasına rağmen özellikle dere ya da denizden çıkarılan ve yüksek nem içeren malzemelerin elenmesinde yaş (su ile) eleme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yaş eleme esnasında eleğe beslenen malzeme ile birlikte, yüksek oranda su verilerek ince taneciklerin iri taneler üzerinden temizlenmesi ve elek altına geçirilmesi kolaylaştırılmaktadır. Elek üzerine su verme işlemi uygun yerlere yerleştirilen boru tesisi ve su püskürtücüleri ile sağlanmaktadır (Wills ve Napier-Munn, 2006).



Şekil 4. Titreşimli elek

Eleğe beslenen malzeme, eleğin arka yüzeyine temas eder etmez, ön tarafa doğru hızlandırılır.

Bu hareket yüzeydeki malzeme yüksekliğinin hızla azalarak malzemenin elek yüzeyine homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Bu esnada ince malzemenin büyük bir kısmı ilk bir metre içerisinde hızla alta geçer, böylece eleğin en yüklü olan başlangıç bölgesinin yükü, hızla dağıtılmış ve dengelenmiş olur. Bu aşamadan sonra elek yüzeyine dağıtılmış malzeme, yavaşlatılarak etkin bir şekilde elenir (Arman, 2014).

Kırma eleme tesislerinde üretim aşamasındaki maliyet oranları incelendiğinde, maliyetin yaklaşık olarak yarısının kırma-eleme-yıkama devrelerinde olduğu görülmektedir (Çizelge 1).

Çizelge 1. Kırmataş üretim aşamasına ait maliyet analizleri (Arman, 2014)

| Üretim aşaması               | Maliyet Oranı (%) |
|------------------------------|-------------------|
| Delme-patlatma               | 18-21             |
| Gevşetme, ufalama ve yükleme | 15-17             |
| Taşıma/nakliye               | 14-16             |
| Kırma-eleme-yıkama           | 46-53             |

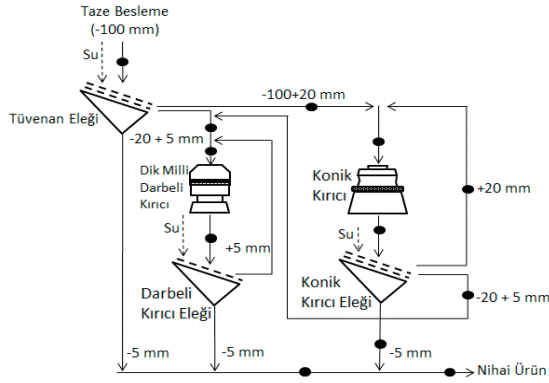
Bu sonuç, kırma eleminin, dolayısıyla doğru tesis tasarımlarının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, bir kırma eleme devresinin normal çalışma koşulları altında performansının belirlenmesi, tesis çalışmalarından elde edilen veriler ve uygun model yapıları kullanılarak devrede yer alan kırıcı ve eleklerin modellenmesi son aşamada ise simülasyon yolu ile devrenin normal çalışma koşullarının tahmini ve devrede yapılacak olan değişikliklerin devre performansı üzerine etkilerinin araştırılmasıdır. Devrede yapılacak olası bir iyileştirme kırma taş üretiminde önemli bir tasarrufa olanak sağlayacaktır.

## 1. TESİS ÇALIŞMALARI

Sakarya ili sınırları içerisinde yer alan ve hammaddesini Sakarya nehrinden karşılayan bir kırma eleme tesisinin performans değerlendirme ve optimizasyonuna yönelik detaylı numune alma çalışmaları yürütülmüştür. Kırma eleme tesisinin basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları Şekil 5'te verilmektedir.





Şekil 5. Kırma eleme devresinin basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları

Tesis akım şemasında ilk olarak 20 mm ve 5 mm açıklıklı çift katlı tüvenan eleğe gelen -100 mm besleme malzemesi -100+20 mm, -20+5 mm ve -5 mm olarak üç farklı fraksiyona ayrılmaktadır. -100+20 mm fraksiyonu konik kırıcıya, -20+5 mm fraksiyonu ise dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Tüvenan elekten alınan -5 mm fraksiyonu ise nihai ürüne eklenmektedir. Konik kırıcı ürünü 20 mm ve 5 mm açıklıklı çift katlı konik kırıcı eleğine beslenmektedir. Bu elekten alınan +20 mm fraksiyonu tekrar konik kırıcıya, -20+5 mm fraksiyonu ise dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Konik kırıcı eleğinden elde edilen -5 mm fraksiyonu ise nihai ürüne eklenmektedir. Dik milli darbeli kırıcı ürünü 5 mm açıklığa sahip darbeli kırıcı eleğine beslenmektedir. Bu eleğin üstü konik kırıcı eleği -20+5 mm fraksiyonu ile birleşerek tekrar dik milli darbeli kırıcıya beslenmektedir. Dik milli darbeli kırıcı eleğinden alınan -5 mm malzeme ise nihai ürüne eklenmektedir. Tüvenan eleği, konik kırıcı eleği ve dik milli darbeli kırıcı eleğinden elde edilen -5 mm fraksiyonlarının toplamı ise nihai ürünü oluşturmaktadır. Devrede yer alan ekipmanlara ait teknik özellikler orijinal kataloglarından temin edilmiştir. Konik kırıcı, dik milli darbeli kırıcı ve eleklerle ait teknik özellikler sırasıyla Çizelge 2, Çizelge 3 ve Çizelge 4'te sunulmaktadır.

Çizelge 2. Devrede yer alan konik kırıcıya ait teknik özellikler

| Besleme Kapalı Ağız Açıklığı (mm) |          | Motor Gücü (kW) | Kırıcı Kapasitesi (t/s) |          |
|-----------------------------------|----------|-----------------|-------------------------|----------|
| En büyük                          | En küçük |                 | En büyük                | En küçük |
| 22                                | 15       | -               | 262                     | 199      |

Çizelge 3. Devrede yer alan dik milli darbeli kırıcıya ait teknik özellikler

| Besleme Tonajı (t/s) | Rotor Çapı (mm) | Rotor Hızı (rpm) | Rotor Çevresel Hızı (m/s) | Motor Gücü (kW) |
|----------------------|-----------------|------------------|---------------------------|-----------------|
| 710                  | 850             | 1250-1800        | 45-75                     | 520             |

Çizelge 4. Devrede yer alan eleklerle ait teknik özellikler

| Elek Açıklığı (mm) | Boy x En (m x m) | Tel Kalınlığı (mm) |
|--------------------|------------------|--------------------|
| 20                 | 6 x 2            | 5                  |
| 5                  | 6 x 2            | 2                  |

Devrede yer alan konik kırıcının maksimum besleme tane boyu 200 mm'dir. Aynı zamanda kapalı ağız açıklığı 8 mm'ye kadar düşürülebilmektedir. Ancak kırıcıda kullanılan astar, ağız açıklığının 15 mm'ye kadar düşürülmesine izin vermektedir. Devrede yer alan dik milli darbeli kırıcı maksimum besleme boyu 50 mm'dir.

### 1.1. Numune Alma Çalışmaları

Numune alma çalışmaları üç farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Test 1 kapsamında tesisin normal çalışma koşullarında konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 22 mm'de iken tüm devre etrafından numuneler alınmıştır. Test 2 kapsamında konik kırıcı ağız açıklığı 18 mm'ye düşürülerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır. Test 3 kapsamında ise konik kırıcı kapalı ağız açıklığı en düşük değeri olan 15 mm'ye düşürülerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır.

Test 1'in amacı tesisin normal çalışma koşulları altındaki performansını belirlemektir. Test 2 ve Test 3'ün amacı ise devrede ana kırma ekipmanı olarak yer alan konik kırıcı kapalı ağız açıklığının hem ekipman performansı hem de devre performansı üzerine etkilerini araştırmaktır. Test 2 ve Test 3 sırasında devre etrafı numunesi alınmamıştır. Tesiste yer alan dik milli darbeli kırıcı boyut indirgememin yanı sıra ürünün kübiklik derecesini arttıracak şekilde çalıştırıldığı için bu kırıcıdan farklı koşullarda numune alınmamıştır.

Numune alma çalışmalarına başlamadan önce normal çalışma koşullarında devrenin kararlı durumda olup olmadığının takip edilmesi amacıyla kontrol odasında besleme tonajı, kırıcı motor akımı, kırıcı yatak sıcaklığı, gibi parametrelerin zamana bağlı değişimi gözlemlenmiştir.

Test 1 esnasında devrenin tamamen kararlı durumda olduğuna karar verildikten sonra ani duruş ile tüm ekipman ve bant konveyörlerin aynı anda durması sağlanmıştır. Daha sonra Şekil 5'te verilen noktalardaki konveyörlerden bantın belirli bir mesafesini tamamen sıyırmak suretiyle temsili numuneler alınmıştır. Ayrıca numune alınan tüm konveyör bantların hızları takometre yardımı ile ölçülmüştür. Alınan numuneler nem içeriklerinin belirlenebilmesi amacıyla yaş şekilde tartılmıştır. Daha sonra tane boyu dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne gönderilmiştir. Tesiste numune alınan bant konveyörlerden bazılarının görüntüsü Fotoğraf 1'de verilmektedir.



Fotoğraf 1. Numune alma çalışmaları

Test 1'in tamamlanmasının ardından Test 2 ve Test 3 kapsamında konik kırıcının kapalı ağız açıklığı değiştirilerek kırıcı beslemesi ve ürününden numuneler alınmıştır. Kapalı ağız açıklığı kırıcı ürününün en iri tane boyunu, tane boyu dağılımını, kırıcı kapasitesi ve kırıcı güç tüketimini etkileyen en önemli parametredir (Yıldız, 2010).

Ağız açıklığı kırıcı boş halde çalışırken içerisine çapı sabit kurşun bilye atılarak ölçülmüştür. Konik kırıcı etrafında yapılan her bir örnekleme sırasında öncelikle kırıcı boş halde çalıştırılarak kapalı ağız açıklığı ayarlanmıştır. Devrede kararlı çalışma koşullarının sağlanmasının ardından ani duruş ile tüm bantlar durdurulmuştur. Konik kırıcı beslemesi ve ürününden alınan numunelerin tane boyu dağılımları belirlenerek kapalı ağız açıklığının ürün inceliği üzerine olan etkisi belirlenmiştir. Konik kırıcı testlerine ait koşullar Çizelge 5'te sunulmaktadır.

Çizelge 5. Konik kırıcı test koşulları

|                           | Test 1* | Test 2 | Test 3 |
|---------------------------|---------|--------|--------|
| Kapalı Ağız Açıklığı (mm) | 22      | 18     | 15     |
| Açık Ağız Açıklığı (mm)   | 54      | 50     | 47     |
| Kapasite (t/s)            | 207     | 202    | 193    |

\*Devre etrafı numune alınan koşul

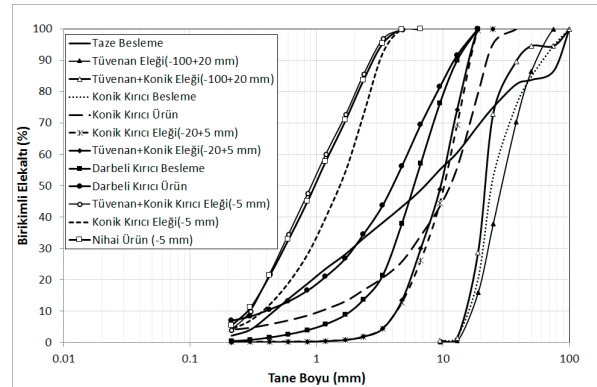
## 2. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Laboratuvar çalışmaları kapsamında tüm numunelerin tane boyu dağılımı en iri boydan 212  $\mu$ m'e kadar  $\sqrt{2}$  elek serisi kullanılarak yaş eleme yöntemi ile belirlenmiştir. Elek analizi sırasında kullanılan elek boyları Çizelge 6'da sunulmaktadır.

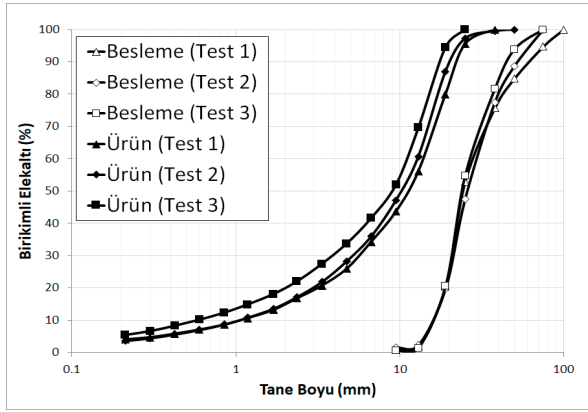
Çizelge 6. Elek analizlerinde kullanılan elek boyları

| Elek Boyu (mm) |       |
|----------------|-------|
| 75,0           | 3,35  |
| 50,0           | 2,36  |
| 38,0           | 1,70  |
| 25,0           | 1,18  |
| 19,0           | 0,85  |
| 13,2           | 0,60  |
| 9,50           | 0,425 |
| 6,70           | 0,300 |
| 4,75           | 0,212 |

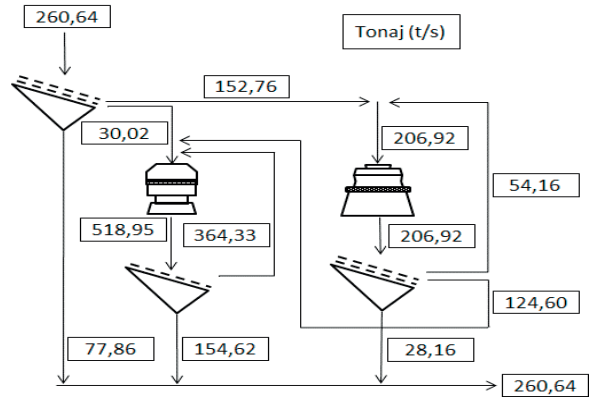
Test 1'e ait devre etrafı ölçülen tane boyu dağılımları Şekil 6'da, konik kırıcı kapalı ağız açıklığının değiştirilmesi ile elde edilen kırıcı beslemesi ve ürünlerine ait tane boyu dağılımları ise Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 6. Kırma eleme devresi ölçülen tane boyu dağılımları (Test 1)



Şekil 7. Konik kırıcı etrafı ölçülen tane boyu dağılımları



Şekil 8. Kırma eleme devresi madde denklığı sonucu elde edilen kuru tonaj değerleri (Test 1)

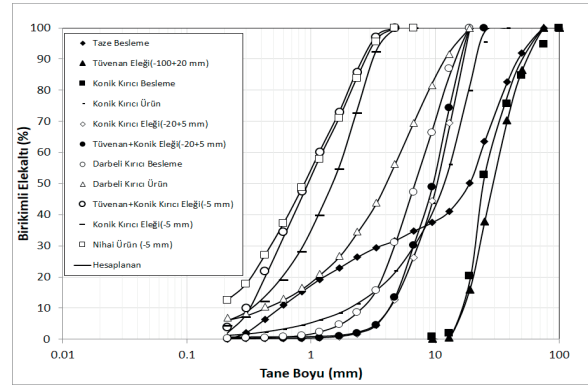
### 3. MADDE DENKLİĞİ ÇALIŞMALARI

Herhangi bir örneklemeye çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçüm hatalarından ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denklığı, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak, devre etrafındaki akışların en iyi şekilde tahmin edilmesini kapsamaktadır.

Kırma eleme tesisinden alınan tüm numunelerin tane boyu dağılımları ve kontrol odasında kaydedilen ve bant hızı ölçümü ile elde edilen tonaj değerleri kullanılarak madde denklığı çalışmaları yürütülmüştür. Bu çalışmalar sırasında madde denklığı algoritması kullanılmıştır. Madde denklığı sonucunda devre etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak Test 1 için devredeki tüm kolların akış değerleri, Test 2 ve Test 3 için ise konik kırıcı besleme ve ürün akış değerleri (tonajları) hesaplanmıştır.

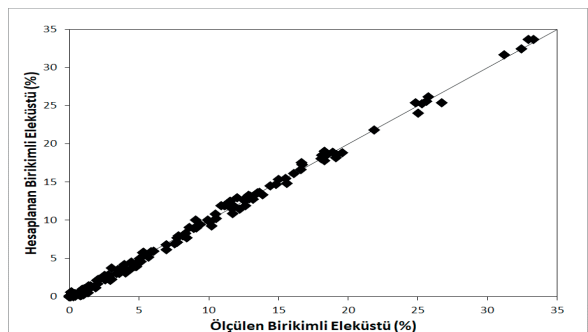
Madde denklığı sonucunda düzeltilen tane boyu dağılımları ve hesaplanan devre etrafı akış değerlerinin yanı sıra, örneklemenin fiziksel koşullar sebebiyle yapılamadığı akışlar da bu çalışma ile hesaplanmıştır.

Madde denklığı çalışmaları, taze beslemeye ait nem değeri (%5,30) kullanılarak hesaplanan kuru tonaj değeri baz alınarak yürütülmüştür. Madde denklığı sonucu kırma eleme devresinde Test 1 için hesaplanan kuru tonaj değerleri Şekil 8'de, hesaplanan tane boyu dağılımları ise ölçülen değerlerle birlikte Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 9'da her bir veri noktası ölçülen değerleri, düz çizgiler ise hesaplanan (düzeltilmiş) değerleri ifade etmektedir.



Şekil 9. Kırma eleme devresi ölçülen ve madde denklığı sonucunda hesaplanan devre etrafı tane boyu dağılımları (Test 1)

Numune alma çalışmalarından elde edilen tane boyu dağılımları ile madde denklığı sonucu elde edilen tane boyu değerlerinin "y=x" doğrusu üzerinde birleştiği net bir şekilde görülmektedir. Bu durum devre etrafı örneklemesinin doğru yapıldığını teyit etmektedir (Şekil 10).



Şekil 10. Ölçülen hesaplanan birikimli elek üstü değerleri (Test 1)

#### 4. PERFORMANS DEĞERLENDİRME ÇALIŞMALARI

##### 4.1. Kırıcı Performanslarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde kırma eleme devresinde yer alan kırıcıların indirgeme oranları her bir test için ayrı ayrı hesaplanmıştır. İndirgeme oranı kırıcıya giren malzemenin %80'inden geçen tane boyunun ( $F_{80}$ ) kırıcı ürününün %80'inden geçen tane boyuna ( $P_{80}$ ) bölünmesi ile hesaplanır (Wills ve Napier-Munn, 2006).

Devrede yer alan konik ve dik milli darbeli kırıcının hesaplanan besleme ve ürün tane boyu dağılımları kullanılarak elde edilen kırıcı indirgeme oranları tüm testler için Çizelge 7'de sunulmaktadır.

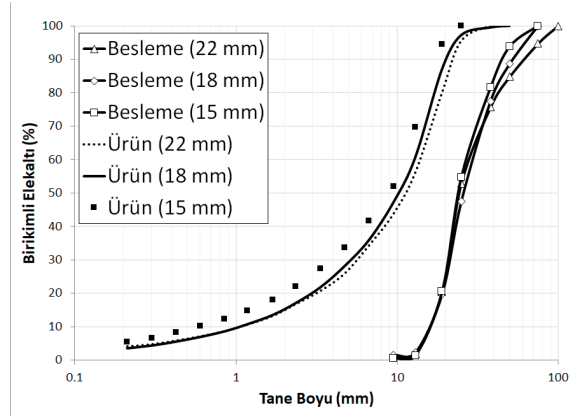
Çizelge 7. Kırıcılara ait indirgeme oranları

| Test | Kırıcı  | $F_{80}$ (mm) | $P_{80}$ (mm) | İndirgeme Oranı |
|------|---------|---------------|---------------|-----------------|
| 1    | Darbeli | 12,08         | 8,96          | 1,35:1          |
|      | Konik   | 39,96         | 18,76         | 2,13:1          |
| 2    | Konik   | 40,74         | 17,43         | 2,34:1          |
| 3    | Konik   | 37,22         | 15,50         | 2,40:1          |

Çizelge 7 incelendiğinde devrede yer alan dik milli darbeli kırıcının indirgeme oranı 1,35:1 olarak hesaplandığı görülmektedir. Dik milli darbeli kırıcıların genel kullanım amaçları ve indirgeme oranları incelendiğinde performansının kapasitesi ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Devrede yer alan konik kırıcı performansı incelendiğinde normal çalışma koşullarındaki indirgeme oranının 2,13:1 olduğu görülmektedir. Konik kırıcıların genel indirgeme oranları 3-7:1 civarındadır. Konik kırıcının teknik özellikleri incelendiğinde 22 mm kapalı ağız açıklığı için kapasitesinde herhangi bir sorun olmadığı gözlenmektedir. Ancak konik kırıcı besleme tane boyu dağılımının ince olması  $F_{80}$  değerini düşürmekte, bu nedenle indirgeme oranı ortalama değerlerin altında kalmaktadır. Konik kırıcılar 200 mm'ye kadar beslemeyi kabul edebilmektedirler.

Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ise kırıcı indirgeme oranını 2,13:1'den 2,40:1 değerine kadar yükseltmiştir. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi hem kırıcı beslemesi hem de kırıcı ürün tane boyu dağılımlarını inceltmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Konik kırıcı farklı ağız açıklıklarında elde edilen ürün tane boyu dağılımları

Şekil 11 incelendiğinde kapalı ağız açıklığının düşürülmesi kırıcıdan çıkan en iri boyun da incelmeye neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak, 20 mm'lik konik kırıcı eleğinin üzerinde kalarak tekrar kırıcıya dönen malzemenin de özellikle iri boylardaki dağılımı incelenmektedir. Konik kırıcı ağız açıklığının düşürülmesi ürün inceliğinin artmasının yanı sıra kırıcı ürünü içerisindeki -5 mm'lik malzeme miktarında da bir iyileşmeye neden olmaktadır. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi sonucunda kırıcı ürünü içerisindeki 5 mm'den ince malzeme yüzdesi %26,95'ten, %34,74'e kadar yükselmiştir.

##### 4.2. Elek Performanslarının Değerlendirilmesi

Elekler en temel anlamda üzerinde belirli boyutlarda açıklıklar bulunan yüzeylerdir. Bu yüzeye temas eden taneler ise açıklıktan iri veya ince olmalarına göre ya elek altına geçerler ya da elek üzerinde kalırlar. Eleklerde performans ise değişik yöntemler kullanılarak belirlenmektedir. Performans hesaplamalarında elek beslemesinde, elek açıklığından daha ince boyda olan malzemenin ne kadarının elek altına geçtiği hesaplanarak elek verimliliği değerlendirilebilir (Whiten, 1972).

Eleklerde elek açıklığı ve kesme boyu aynı değeri almaktadır. Ancak pratik uygulamalarda eleğin kesme boyu daima elek açıklığından daha düşük olmaktadır. Elek yüzeyinde herhangi bir aşınma veya delik yoksa iri ürünün elek altına geçmesi de olası bir durum değildir. Bu nedenle elek verimi genelde elek altına geçmesi gerekirken elek üstünde kalan malzeme miktarına göre hesaplanmaktadır (Whiten, 1972).

Bu durumda elek verimi basitçe Eşitlik 1'deki şekilde ifade edilmektedir.

$$V = \frac{x}{a} \quad (1)$$

Burada, V, elek verimini, x, elek altına geçen malzeme miktarını (t/s), a ise elek altına geçmesi gereken malzeme miktarını (t/s) ifade etmektedir.

Tesislerde genellikle %95 elek verimi hedeflenmektedir (Yıldız, 2010). Elemede %100'lük bir verim elde etmek için ise kapasitenin büyük oranda düşürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle kapasite ve elek verimi birlikte değerlendirilmesi gereken iki işletme parametresidir (Yıldız, 2010). Devrede yer alan eleklerle ait verim değerleri Çizelge 8'de sunulmaktadır.

Çizelge 8. Devrede yer alan eleklerle ait verim değerleri

| Elek Adı ve Açıklığı        | Besleme Tonajı (t/s) | Verim (%) |
|-----------------------------|----------------------|-----------|
| Tüvenan Elek (20 mm)        | 260,64               | 78,09     |
| Konik Kırıcı Eleği (20 mm)  | 207,07               | 87,94     |
| Tüvenan Elek (5 mm)         | 107,88               | 93,12     |
| Konik Kırıcı Eleği (5 mm)   | 152,91               | 61,09     |
| Darbeli Kırıcı Eleği (5 mm) | 518,81               | 51,39     |

Çizelge 8 incelendiğinde, 20 mm elek açıklığına sahip tüvenan eleğin veriminin %78, konik kırıcı eleğinin veriminin ise yaklaşık olarak %88 olduğu görülmektedir. Elek boyutları, elek yüzey alanları, genlik ve titreşimleri ile yıkama suyu miktarları aynı olmasına rağmen tüvenan elek grubunda yer alan 20 mm açıklıklı elek konik kırıcı grubunda yer alan eleğe göre daha verimsiz bir ayırım yapmaktadır. Bu eleklerin üzerlerine gelen malzeme miktarları incelendiğinde ise 20 mm açıklıklı tüvenan eleğine 260 t/s, 20 mm açıklıklı konik kırıcı eleğine ise 207 t/s besleme yapıldığı görülmektedir. Aynı yüzey alanında daha fazla malzeme eleven tüvenan eleğin üzerinde konik kırıcı eleğine göre daha kalın bir malzeme yatağı oluşmaktadır. Bu yatak, elek üzerindeki tanelerin elek yüzeyi ile temasını zorlaştırmakta ve daha zor elenmelerine yol açmaktadır. Tanelerin daha zor elenmesi sonucunda ise elek verimi düşmekte ve elek altı tane boyu dağılımı bir başka deyişle eleğin kesme boyu incelmektedir.

Bu sonuç, aynı özelliklere sahip eleklerde eleğe beslenen malzeme miktarının elek performansı üzerinde önemli bir etken olduğunu göstermektedir.

dir. Besleme tonajının elek üzerindeki yatak kalınlığını dolayısıyla elek kesme boyunu ve verimini etkilediği de düşünülmektedir.

Tüvenan ve konik kırıcı elek grubu 5 mm açıklıklı eleklerin üzerine gelen malzeme miktarları sırasıyla 107,88 t/s ve 152,91 t/s olarak hesaplanmıştır. Her iki eleğin verim değeri incelendiğinde ise 20 mm açıklıklı eleklerle benzer şekilde üzerine daha fazla yük gelen eleğin verimi daha düşüktür (Çizelge 8).

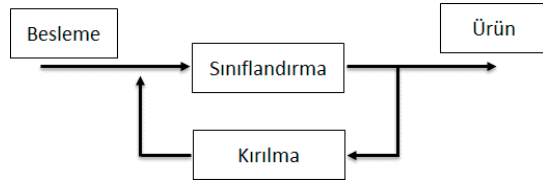
Darbeli kırıcı elek grubunda yer alan 5 mm açıklıklı elek en düşük verim değerine sahiptir. Darbeli kırıcı eleğinin diğer eleklerle aynı özelliklere sahip olmasına rağmen üzerine gelen tonajın çokluğu nedeniyle elek verimi yaklaşık olarak %51 değerinde kalmaktadır.

## 5. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

### 5.1. Kırıcı Modeli

Modelleme çalışmalarında devrede bulunan kırıcılar ve elekler uygun ekipman modelleri kullanılarak ayrı ayrı modellenmiş, modelin tahmin gücü ise madde denkliği ile hesaplanan değerlerin model ile tahmini yoluyla sınanmıştır.

Devrede yer alan kırıcılar için Whiten (1972) kırıcı modeli kullanılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Whiten kırıcı modelinin basitleştirilmiş akım şeması

Whiten kırıcı modeli kırma işlemi için basit bir madde denkliği kurularak geliştirilmiştir (Whiten, 1972).

Kırıcı içerisine giren besleme ya doğrudan kırıcıdan çıkmakta ya da kırıcı içerisinde kırılarak alt boylara dağılmaktadır. Kapalı ağız açıklığından ince taneler kırıcıdan kırılmadan çıkarken, ağız açıklığından iri taneler ise kırıcıdan çıkmadan önce mutlaka kırılarak alt boylara dağılmaktadır. Bu iki boy arasında yer alan taneler ise belirlili olasılıklarda kırılarak alt boylara dağılmakta ve kırıcıdan çıkmaktadır.

Bu işlem için madde denkliği eşitlikleri yazılabilmektedir. Bu eşitliklerden ilki kırıcıda kırılacak olan tanelerin oranını belirleyen ve çapraz bir matristen oluşan sınıflandırma matrisi, ikincisi ise kırıcıda kırılan tanelerin alt boylara nasıl dağıldığını gösteren kırılma matrisidir. Sınıflandırma ve kırılma matrisini gösteren eşitlikler sırasıyla Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te verilmektedir.

$$X = p + Cx \quad (2)$$

$$X = f + BCx \quad (3)$$

Burada,

X kırıcıya giren tane boyu dağılımı, C sınıflandırma matrisi, B kırılma matrisi, f besleme tane boyu dağılımını ifade eden vektör ve p, ürün tane boyu dağılımını ifade eden vektördür.

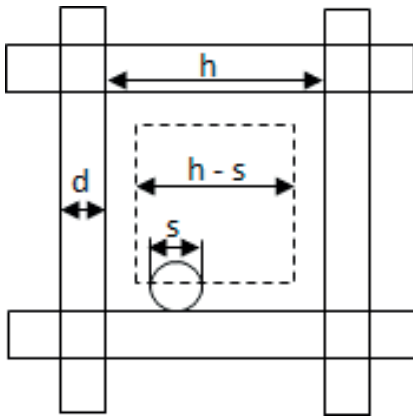
Bu iki eşitlik basit bir şekilde tek bir eşitliğe dönüştürülebilmektedir (Eşitlik 4).

$$p = (I - C). (I - BC)^{-1}. f \quad (4)$$

Burada, I birim matrisi ifade etmektedir. Bu eşitlik besleme tane boyu dağılımının bilindiği durumlarda ürün tane boyu dağılımının hesaplanmasında kullanılabilir.

## 5.2. Elek Modeli

Devrede yer alan eleklerin modellenmesinde olasılık modeli kullanılmıştır. Bu model yapısında s boyutundaki bir tanenin tek bir denemede elek altına geçme olasılığı Şekil 13'te gösterilen terminoloji kullanılarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 13. Titreşimli elek olasılık modelinin terminolojisi (Napier-Munn vd., 1996)

Model yapısında elek alanı (açıklık + tel)  $(h+d)^2$  olarak hesaplanmaktadır. Burada, h elek açıklığını, d ise tel kalınlığını ifade etmektedir. Elek beslemesinde yer alan s boyutundaki bir tane tel üzerinde zıplamadan elek altına geçebilmek için  $(h-s)^2$  lik bir alana düşmek zorundadır. Bu durumda bir tanenin elek altına geçme olasılığı Eşitlik 5'te verilmektedir.

$$[(h - s)/(h + d)]^2 \quad (5)$$

S boyutundaki bir tanenin m deneme sonrası elek altına geçememe olasılığı ise Eşitlik 6'da verilmektedir. Bu eşitlik elek için gerekli performans eğrisini sağlamaktadır.

$$[1 - \{(h - s)/(h + d)\}^2]^m \quad (6)$$

Herhangi bir tanenin elek altına geçmesi için gerekli deneme sayısı m, bir verim katsayısı  $(k_1)^2$ , eleğin uzunluğu ve yük faktörü (f) ile orantılıdır (Eşitlik 7).

$$k_1^2 \cdot l \cdot f \quad (7)$$

Yük faktörü düşük besleme tonajlarında tek bir değer alırken besleme tonajı arttıkça azalmakta ve sifıra gitmektedir. Yapılan literatür çalışmalarında verim katsayısının tonaj ile birlikte değişmesine izin verildiğinde tahmin edilen ve ölçülen elek verimi arasındaki ilişkinin çok daha yakın olduğu görülmüştür (Napier-Munn vd., 1996).

## 5.3. Model Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Modelleme çalışmasının başarısını değerlendirmek üzere tüvenan beslemenin tane boyu dağılımı ve tonajı ile kırıcı ve elek model parametreleri girilerek Test 1 koşulları için tüm devredeki akış kollarına ait tane boyu dağılımları ve tonajlar hesaplanmıştır.

Madde denkliği sonucunda hesaplanan tonaj değerlerinin modelleme çalışmaları sonunda elde edilen değerlerle karşılaştırması Çizelge 9'da sunulmaktadır.

Çizelge 9 incelendiğinde madde denkliği ile hesaplanan akış tonajlarının model tarafından başarılı bir şekilde tahmin edildiği görülmektedir. Şekil 14'te madde denkliği ile hesaplanan ve model tarafından tahmin edilen tane boyu dağılımlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 14'te her bir veri noktası hesaplanan değerleri, düz çizgiler tahmin edilen değerleri ifade etmektedir. Elde

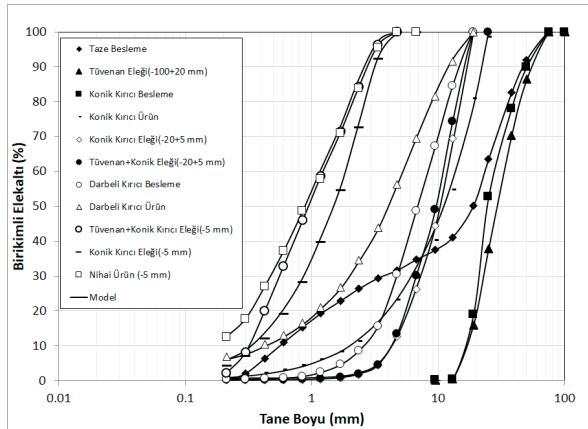
edilen sonuçlar, modelin devre etrafı tane boyu dağılımlarını belirlemede başarılı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 9. Madde denklığı ve model sonuçlarının karşılaştırılması (Test 1 koşulu)

| Akış Adı                      | Tonaj (t/s)    |        |
|-------------------------------|----------------|--------|
|                               | Madde Denklığı | Model  |
| Tüvenan Besleme               | 260,64         | 260,64 |
| Tüvenan Elek -100+20 mm       | 152,76         | 152,18 |
| Tüvenan Elek -20+5 mm         | 30,02          | 28,16  |
| Tüvenan elek -5 mm            | 77,86          | 80,31  |
| Konik Kırıcı Besleme          | 206,92         | 209,13 |
| Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm | 54,16          | 54,95  |
| Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm   | 124,60         | 123,57 |
| Konik Kırıcı Eleği -5 mm      | 28,16          | 30,61  |
| Darbeli Kırıcı Besleme        | 518,95         | 517,78 |
| Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm | 364,33         | 367,28 |
| Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm    | 154,62         | 150,49 |
| Nihai Ürün                    | 260,64         | 260,64 |

Çizelge 10. Devrede yer alan kırıcılara ait hesaplanan model parametreleri

| Tane Boyu (mm) | Kırılma Matrisi | Sınıflandırma Matrisi |                |
|----------------|-----------------|-----------------------|----------------|
|                |                 | Konik Kırıcı          | Darbeli Kırıcı |
| 75             | 0,29            | 1,00                  | 0,56           |
| 50             | 0,22            | 1,00                  | 0,54           |
| 38             | 0,14            | 1,00                  | 0,53           |
| 25             | 0,11            | 0,87                  | 0,51           |
| 19             | 0,07            | 0,69                  | 0,49           |
| 13             | 0,05            | 0,58                  | 0,48           |
| 9,5            | 0,03            | 0,47                  | 0,47           |
| 6,7            | 0,03            | 0,39                  | 0,45           |
| 4,75           | 0,02            | 0,32                  | 0,44           |
| 3,35           | 0,01            | 0,26                  | 0,42           |
| 2,36           | 0,01            | 0,21                  | 0,41           |
| 1,7            | 0,01            | 0,17                  | 0,40           |
| 1,18           | 0,004           | 0,14                  | 0,39           |
| 0,85           | 0,003           | 0,12                  | 0,37           |
| 0,6            | 0,002           | 0,10                  | 0,36           |
| 0,425          | 0,001           | 0,08                  | 0,35           |
| 0,3            | 0,001           | 0,06                  | 0,34           |
| 0,212          | 0,001           | 0,05                  | 0,33           |



Şekil 14. Madde denklığı ile hesaplanan ve model ile tahmin edilen devre etrafı tane boyu dağılımları

Kırıcılar ve elekler için hesaplanan model parametreleri sırasıyla Çizelge 10 ve Çizelge 11'de sunulmaktadır. Çizelge 10'da yer alan kırılma ve sınıflandırma matrisleri, kırıcı beslemesi ve ürüne ait tane boyu dağılımları kullanılarak geri hesaplama yöntemi ile belirlenmiştir.

Çizelge 11. Devrede yer alan eleklerle ait hesaplanan model parametreleri

| Parametre | Tüvenan Eleği |       | HP3 Eleği |       | Barmac Eleği |
|-----------|---------------|-------|-----------|-------|--------------|
|           | 20 mm         | 5 mm  | 20 mm     | 5 mm  | 5 mm         |
| d (mm)    | 5             | 2,5   | 5         | 2,5   | 2,5          |
| h (mm)    | 20            | 5     | 20        | 5     | 5            |
| l (m)     | 6             | 6     | 6         | 6     | 6            |
| $k_1$     | 1             | 1     | 1         | 1     | 1            |
| f         | 3,18          | 13,97 | 31,81     | 6,35  | 1,16         |
| m         | 19,09         | 83,82 | 190,88    | 38,08 | 6,98         |

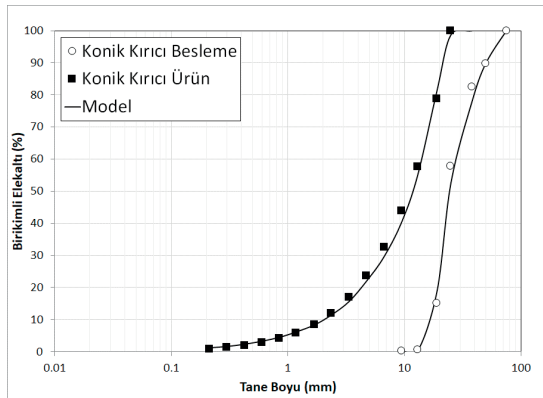
#### 5.4. Simülasyon Çalışmaları

Modelleme sonucu elde edilen parametre değerleri kullanılarak devrede kapasite ve verim artışı sağlayabilecek alternatifler simülasyon yoluyla değerlendirilmiştir. Çalışmalarda simülasyon yazılımına girdi olarak tesis besleme tonajı ve tane boyu dağılımı kullanılmıştır. Devrede yer alan ekipmanların model parametreleri ile birlikte bu veriler kullanılarak farklı kırıcı açıklıkları veya

farklı elek açıklıklarında elde edilecek ürünlerin tonajı ve tane boyu dağılımları ile ekipman verimleri Şekil 5'te yer alan akım şemasına göre belirlenmiştir.

#### 5.4.1. Konik Kırıcı Kapalı Ağız Açıklığının (KAA) Değiştirilmesi

İlk simülasyon senaryosunda devrede yer alan konik kırıcının kapalı ağız açıklığı 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmüştür. Bu durumda konik kırıcının ürettiği 5 mm'den ince malzeme miktarındaki artışın konik kırıcı ve konik kırıcı elek grubu performansları üzerindeki etkileri tahmin edilmiştir. Bu senaryoda performans değerlendirme ve simülasyon sonucu elde edilen kırıcı ürünleri karşılaştırılmış ve tane boyu dağılımlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür (Şekil 15.)



Şekil 15. Konik kırıcı ürünün simülasyon ile tahmini (KAA: 15 mm)

Bu sonuç modelin farklı ekipman parametrelerinde tahmin gücünün oldukça yüksek olduğunu da açıkça göstermektedir. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi sonrasında konik kırıcı ve darbeli kırıcı besleme tonajlarında düşüş görülmektedir. Ayrıca konik kırıcı ürününün daha ince bir tane boyu dağılımına sahip olması konik kırıcı elek grubunda iri malzeme miktarında azalışa, 5 mm'den ince malzeme miktarında ise artışa neden olmaktadır (Çizelge 12).

Çizelge 12. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ile tahmin edilen tonajlar

| Akış Adı                      | Tonaj (t/s) |           |
|-------------------------------|-------------|-----------|
|                               | KAA 22 mm   | KAA 15 mm |
| Tüvenan Besleme               | 260,64      | 260,64    |
| Tüvenan Elek -100+20 mm       | 152,18      | 155,02    |
| Tüvenan Elek -20+5 mm         | 28,16       | 26,69     |
| Tüvenan elek -5 mm            | 80,31       | 78,92     |
| Konik Kırıcı Besleme          | 209,13      | 193,88    |
| Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm | 54,95       | 38,86     |
| Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm   | 123,57      | 110,57    |
| Konik Kırıcı Eleği -5 mm      | 30,61       | 44,45     |
| Darbeli Kırıcı Besleme        | 517,78      | 474,31    |
| Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm | 367,28      | 331,64    |
| Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm    | 150,49      | 137,26    |
| Nihai Ürün                    | 260,64      | 260,64    |

Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda konik kırıcı elek grubu eleklerinde tahmin edilen verim değerleri Çizelge 13'te, kırıcı ve elek kollarındaki incelik değerleri ise ( $P_{80}$ ) Çizelge 14'te sunulmaktadır.

Çizelge 13. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucu tahmin edilen konik kırıcı grubu eleklerine ait verim değerleri

| Elek Verimi (%) | KAA 22 mm | KAA 15 mm |
|-----------------|-----------|-----------|
| Konik 20 mm     | 87,94     | 94,07     |
| Konik 5 mm      | 61,09     | 71,56     |

Bu simülasyon çalışması sonucunda tahmin edilen konik kırıcı elek grubu verimleri incelendiğinde her iki elek veriminde de artış olduğu görülmektedir. Kırıcı ağız açıklığının düşürülmesinin ardından 20 mm'lik elek üzerine gelen tonajın azalması, bunun yanı sıra elek besleme tane boyu dağılımının incelenmesi sonucunda elek verimlerinin önemli ölçüde arttığı düşünülmektedir.

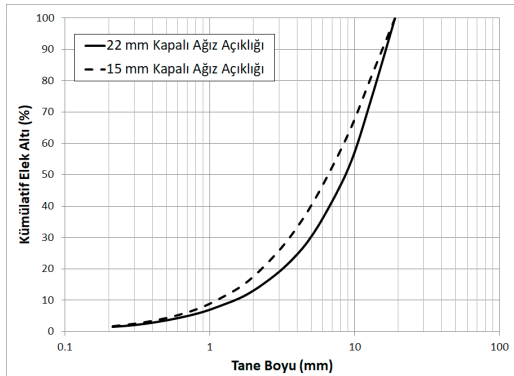


Çizelge 14. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi ile elde edilen incelik değerleri ( $P_{80}$ )

| Akış Adı                      | $P_{80}$ (mm) |           |
|-------------------------------|---------------|-----------|
|                               | KAA 22 mm     | KAA 15 mm |
| Tüvenan Besleme               | 36,24         | 36,24     |
| Konik Kırıcı Besleme          | 36,72         | 41,23     |
| Konik Kırıcı Ürün             | 19,36         | 18,24     |
| Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm | 23,65         | 23,88     |
| Konik Kırıcı Eleği -20+5 mm   | 15,17         | 14,43     |
| Konik Kırıcı Eleği -5 mm      | 2,72          | 2,66      |
| Darbeli Kırıcı Besleme        | 12,00         | 11,46     |
| Darbeli Kırıcı Ürün           | 9,13          | 8,73      |
| Darbeli Kırıcı Eleği -20+5 mm | 10,66         | 10,17     |
| Darbeli Kırıcı Eleği -5 mm    | 1,82          | 1,82      |
| Nihai Ürün                    | 2,01          | 2,04      |

Çizelge 14 incelendiğinde konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda konik kırıcı beslemesinin bir miktar irileştiği, konik kırıcı ürününün ise bir miktar incelendiği görülmektedir. Nihai ürün inceliği ele alındığında ise önemli bir değişiklik gözlenmemektedir.

5 mm'lik eleğin üzerine gelen tonaj 22 mm açıklıkta 153 t/s, 15 mm açıklıkta ise 155 t/s olarak hesaplanmıştır. Ancak konik kırıcının bu iki ürüne ait tahmin edilen tane boyu dağılımları incelendiğinde 15 mm açıklıkta elde edilen kırıcı ürününde -20 mm fraksiyonunun 22 mm açıklıkta elde edilenden çok daha ince olduğu belirlenmiştir.



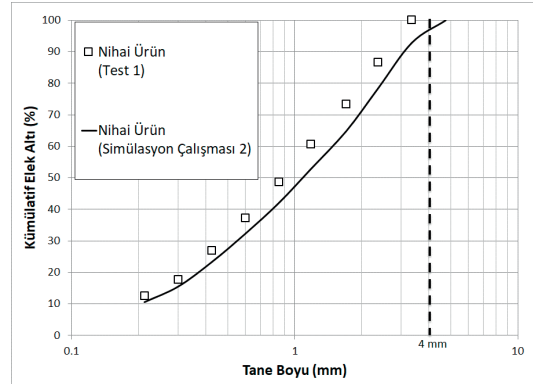
Şekil 16. Farklı kapalı ağız açıklıklarında tahmin edilen konik kırıcı ürünü -20 mm fraksiyonu

Şekil 16 incelendiğinde 22 mm kapalı ağız açıklığında kırıcı ürünü -20 mm fraksiyonunun yaklaşık olarak %30'u 5 mm'den inceyken, bu oran 15 mm kapalı ağız açıklığında %40 olmaktadır. Bu sonuç elek üzerine gelen tonajın yanı sıra besleme içe-

risinde elek açıklığından ince malzeme miktarının da elek performansını etkilediğini göstermektedir. Aynı elek besleme tonajında besleme içerisinde var olan elek açıklığından ince tanelerin artması elek verimini de arttırmaktadır.

#### 5.4.2. İnce Elek Açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye Yükseltilmesi

Tesiste üretilen kırma taş kumu TS 706 EN 12620 standartlarına uygun olacak şekilde üretilmektedir. Bu standartlara göre ince agrega tane büyüklüğü 4 mm'den ince olan agregalardır. Ancak tesisteki elek performansları göz önüne alındığında tesiste üretilen ürünün en üst boyu 3 mm civarındadır. Bu durum 3-4 mm arasındaki tane boyu fraksiyonunun ürün yerine elek üstünde kalmasına ve tesis kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. İkinci simülasyon çalışmasında konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 15 mm'de sabit tutulmuş, nihai ürün elek açıklıkları ise 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılmıştır. Bu çalışmadaki amaç tesisten en üst boyu 4 mm'ye yakın bir nihai ürün alınmasıdır (Şekil 17).



Şekil 17. Normal çalışma koşullarında alınan nihai ürün ile ikinci simülasyon çalışması sonucunda elde edilen nihai ürüne ait tane boyu dağılımları

Şekil 17 incelendiğinde nihai ürün elek açıklıklarının 5 mm'den 6 mm'ye yükseltilmesi durumunda ürün tane boyu dağılımının bir miktar irileştiği görülmektedir. Ancak nihai üründe bulunan en üst boy 4,75 mm olmaktadır. Bu değer TS 706 EN 12620'de yer alan  $\pm 5\%$  tolerans değerini karşılamaktadır. Bu durum tesiste ürün boyutuna gelen ancak elek üstüne giden malzemenin elenerek ürüne dahil olmasını sağlamaktadır.

Elek açıklığının artırılması ise tüm elek gruplarında elek üstü malzeme miktarının azalmasına ve kırıcı besleme tonajlarının düşmesine neden

olmuştur. Bu durum ise devre performansının birinci simülasyon çalışmasından daha iyi değerlere çıkmasını sağlamıştır.

Ancak bu simülasyon çalışmasının amacı devre performansını birinci simülasyon çalışmasına yakın tutarak taze besleme tonajını arttırmaktır. Tüvenan besleme tonajı, kırıcı tonajları devre etrafı örnekleme yapılan koşula (Test 1) en yakın değere gelene kadar arttırılmıştır.

İkinci simülasyon çalışmasına ait sonuçlar Çizelge 15'te sunulmaktadır.

Çizelge 15 incelendiğinde elek açıklıklarının artırılması sonucunda ürün kalitesinde herhangi bir bozulma olmadan tesis kapasitesi 260 t/s'ten 300 t/s değerine çıkmaktadır. Tesis kapasitesindeki artış hali hazırda elenemeyen ürün boyutundaki tanelerin daha verimli elenmesi ile gerçekleşmiştir. Tesisteki kapasite artışı yaklaşık olarak %15'tir. Simülasyon çalışmaları bir bütün olarak ele alındığında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucunda kırıcı ürünü incelmış, konik kırıcı elek grubu verim değerleri artmıştır. Aynı koşulda nihai ürün elek açıklıklarının artırılması sonucunda ise benzer verim değerinde tesis kapasitesinde yaklaşık olarak %15'lik bir artış sağlanmıştır.

Çizelge 15. İkinci Simülasyon çalışmasına ait sonuçlar

| Akış Adı                            | Tonaj (t/s)              |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                     | Test 1 Model (5 mm elek) | Simülasyon 2 (6 mm elek) |
| Tüvenan Besleme                     | 260,64                   | 300,00                   |
| Tüvenan Elek -100+20 mm             | 152,18                   | 178,43                   |
| Tüvenan Elek -20+5 & 6 mm           | 28,16                    | 27,01                    |
| Tüvenan elek -5 & 6 mm              | 80,31                    | 94,56                    |
| Konik Kırıcı Besleme                | 209,13                   | 210,17                   |
| Konik Kırıcı Eleği -100+20 mm       | 54,95                    | 31,74                    |
| Konik Kırıcı Eleği -20+5 & 6 mm     | 123,57                   | 121,57                   |
| Konik Kırıcı Eleği -5 & 6 mm        | 30,61                    | 56,76                    |
| Darbeleri Kırıcı Besleme            | 517,78                   | 496,29                   |
| Darbeleri Kırıcı Eleği -20+5 & 6 mm | 367,28                   | 344,02                   |
| Darbeleri Kırıcı Eleği -5 & 6 mm    | 150,49                   | 148,68                   |
| Nihai Ürün                          | 260,64                   | 300,00                   |

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Sakarya ili sınırları içerisinde ham maddesini Sakarya nehrinden sağlayan bir kırma eleme tesisinin performans değerlendirme ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tesiste yapılan çalışmalar kapsamında ana kırma ekipmanı olan konik kırıcı farklı kapalı ağız açıklıklarında çalıştırılmış ve numuneler toplanmıştır. Devrede yer alan diğer kırma ekipmanı olan dik milli darbeleri kırıcı ise boyut küçültme amacının yanında tanelerin kübiklik derecesini arttırmaya yönelik çalıştırıldığından simülasyon çalışmaları kapsamında model parametreleri sabit tutulmuştur.

Performans değerlendirme çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre dik milli darbeleri kırıcı ortalama indirgeme oranından daha düşük bir değerde çalışmaktadır. Bu kırıcının indirgeme oranının düşük olmasının en önemli nedeni ise tanelerin kübiklik derecesini arttırmaya yönelik çalıştırılmasıdır. Devrede yer alan konik kırıcı da ortalama indirgeme oranlarından daha düşük bir indirgeme oranında çalıştırılmaktadır. Ancak bu durum ekipman verimsizliğinden değil besleme tane boyu dağılımının inceliğindedir. Konik kırıcı besleme tane boyu dağılımının ince olması  $F_{80}$  değerini, dolayısıyla indirgeme oranını düşürmektedir. Konik kırıcı ile farklı kapalı ağız açıklıklarında yapılan testler konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesinin kırıcı indirgeme oranını arttırdığını göstermektedir.

Devrede yer alan elek performansları değerlendirildiğinde ise elek açıklığından bağımsız olarak üzerine gelen malzeme miktarı fazla olan eleklerin verimlerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Normal çalışma şartlarında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının maksimum değer olan 22 mm'de tutulması her ne kadar kapasite kullanımı açısından tesisin yararına gibi görünse de elek verimsizliğine yol açmaktadır. Tesiste gerçekleştirilen testler esnasında konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi sonucu konik kırıcı elek grubunda meydana gelen verim artışı bunu açıkça göstermektedir.

Devrede yer alan ekipmanlar uygun model yapıları kullanılarak modellenmiştir. Modelleme sonucu tahmin edilen tonaj değerleri ile devre etrafı tane boyu dağılımlarının madde denkliği sonucu

hesaplanan değerlere çok yakın olması modelin tahmin gücünün oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

Simülasyon çalışmaları kapsamında öncelikle ekipman verimlerini arttıracak bir çalışma yapılmıştır. Bu koşulda konik kırıcı kapalı ağız açıklığı 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmüştür. Konik kırıcı kapalı ağız açıklığının düşürülmesi tesisin kapasitesi ve ürün kalitesini etkilememiştir. Ancak konik kırıcı indirgeme oranını 2,13:1 değerinden 2,40:1 değerine yükseltmiştir. Ayrıca konik kırıcıdan elde edilen ürün özelliklerinin değişmesi konik kırıcı elek grubundaki elek verimlerini de önemli ölçüde arttırmıştır. Elek verimlerinin artması elek boyundan ince tanelerin daha verimli elenmesine, kırıcıya geri dönen malzeme miktarının azalmasına ve daha verimli bir kırma işleminin gerçekleşmesinde olanak sağlamaktadır.

Simülasyon çalışmalarının ikinci aşamasında ise tesis kapasitesini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda devrede yer alan 5 mm'lik elek açıklıkları 6 mm'ye yükseltilmiştir. Literatürde her ne kadar elek açıklığı ile elek kesme boyu aynı sayılsa da eleme verimi göz önünde bulundurulduğunda elek kesme boyu daima elek açıklığından daha ince bir boyda olmaktadır. Elek açıklıklarının büyümesi sonucunda ürün kalitesini bozmayacak şekilde tesis kapasitesinde %15'lik bir artış öngörülmektedir.

Sonuç olarak, konik kırıcı kapalı ağız açıklığının 22 mm'den 15 mm'ye düşürülmesi ve bu sayede konik kırıcı ve konik kırıcı elek grubunda bir verim artışı sağlanması önerilmektedir.

İkinci olarak normal çalışma koşullarında elek açık alanlarının genellikle yetersiz olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak elek boyutlarının optimize edilmesi düşünülebilir. Ancak simülasyon çalışmaları elek açıklıklarının ürün kalitesini bozmayacak şekilde 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılması sonucunda tesis kapasitesinde yaklaşık olarak %15 bir artış sağlandığını göstermektedir. Elek boyutlarının optimize edilmesi yerine elek panellerinin değiştirilmesinin hem zaman hem de maliyet açısından tasarruf sağlayacağı düşünülmektedir.

Kırma taş tesislerinde maliyetin yaklaşık yarısını

oluşturan kırma-eleme-yıkama devrelerinde basit ve ucuz yöntemlerle gerçekleştirilecek olan bu tür optimizasyonların hem sektöre hem de milli kaynaklarımızın kullanımına olumlu etkiler sağlayacağı unutulmamalıdır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, tesis çalışmaları esnasında yardım ve desteklerini esirgemeyen çalışanlara teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

Arman, Y., 2014. Kırma-Eleme ve Taşıma Makinaları Seminer Notları. s. 71.

Doğan, T., Karadoğan, A., Kahrıman A., Durdu, İ., 2003. İstanbul İli ve Çevresinde Bulunan Kırma-taş Ocaklarına Genel Bir Bakış. III. Ulusal Kırma-taş Sempozyumu, 167-178.

Marcotte, E., 2017. All You Need to Know About: Vertical Shaft Impactor (VSI) Primers, <https://www.stedman-machine.com/vsi-primer-article.html>. (Erişim tarihi: 31.01.2018)

Napier-Munn, T., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., 1996. Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, published by JKMC, Ed Napier-Munn, s. 342.

Whiten, W.J. 1972. The Simulation of Crushing Plants with Models Developed Using Multiple Spline Regression, Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 72 (10), 257.

Wills, B., Napier-Munn, T.J., 2006. Mineral Processing Technology, ISBN: 0750644508, 471.

Yıldız, N., 2010. Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme (Genişletilmiş II. Baskı), ISBN:978-975-96779-2-3, s. 700.

Yılmaz, A.O., Kaya, R., Şentürk, M., Tatarhan, A., Çavuşoğlu, İ., Alp, İ., 2003. 50-130-250-500 ton/saat Kapasiteli Kırma-Eleme Tesislerinin Yatırım ve İşletme Maliyetlerinin Belirlenmesi. III. Ulusal Kırma-taş Sempozyumu, 277-284.



Orijinal Araştırma / Original Research

## ÖN ZENGİNLEŞTİRME SONRASINDA OKSALİK ASİT KULLANIMI İLE CAM KUMU TESİSİ YAN ÜRÜNÜNDEN DÜŞÜK DEMİR İÇERİKLİ MİKRONİZE KUVARS ÜRETİMİ

*PRODUCTION OF MICRONIZED QUARTZ WITH LOW IRON CONTENT USING PRE-CONCENTRATION FOLLOWED BY OXALIC ACID LEACHING FROM BY-PRODUCT OF GLASS SAND PLANT*

Mustafa Özer<sup>a,\*</sup>, Bekir Başkurt<sup>a,\*\*</sup>, Fırat Burat<sup>a,\*\*\*</sup>, Hüseyin Baştürkçü<sup>a,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümü, İstanbul, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 21 Eylül / September 2017

**Kabul Tarihi / Accepted** : 16 Şubat / February 2018

### Anahtar Sözcükler:

Cam kumu,  
yan ürün,  
oksalik asit,  
çözündürme,  
çözündürme kinetiği,  
demir uzaklaştırma.

### Keywords:

Glass sand,  
by-product,  
oxalic acid,  
leaching,  
leaching kinetics,  
iron removal.

### ÖZ

Cam kumu zenginleştirme tesislerinden elde edilen -100 µm boyutundaki yan ürünün bileşimindeki safsızlıkların uzaklaştırılması ile yüksek katma değerli mikronize kuvars üretimi mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, böyle bir üründen yüksek kaliteli silika konsantresi üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla uygulanan kil uzaklaştırma işlemi ile düşük alümina içerikli ön konsantre %0,12 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> demir içeriği ile elde edilmiştir. Elde edilen bu ön konsantre üzerinde gerçekleştirilen oksalik asit ile çözündürme deneyleri sonucunda; %99,16 SiO<sub>2</sub>; %0,04 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; %0,53 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kimyasal içeriğine sahip bir silika konsantresi üretilmiştir. Ayrıca, demirin oksalik asit ortamında çözündürülmesinde sıcaklık-süre ilişkisi temel alınarak yapılan kinetik çalışma ile demir çözünmesinin kimyasal kontrollü bir reaksiyonla gerçekleştiği belirlenmiştir.

### ABSTRACT

High-value-added micronized quartz production can be possible by removing the impurities of -100 micron by-product composition which is obtained from glass sand enrichment plants. In this study, it was aimed to produce high quality silica concentrate from such a product. For this purpose, low alumina content pre-concentrate was obtained with 0.12% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iron content using clay separation process. As a result of acidic leaching experiments with oxalic acid which was performed on this pre-concentrate, a silica concentrate was produced with 99.16% SiO<sub>2</sub>, 0.04% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and 0.53% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents. In addition, according to the kinetic study based on the temperature-time relationship, it was determined that the dissolution of iron in oxalic acid medium occurred by a chemical controlled reaction.

\* Sorumlu yazar: ozermust@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-2642-6782>

\*\* baskurtbekir@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0003-1715-8667>

\*\*\* buratf@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7051-0063>

\*\*\*\* basturkcu@itu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-7301-9317>

## GİRİŞ

Cam üretiminde ana hammadde olarak kullanılan silika ( $\text{SiO}_2$ ), masif kuvars, kuvarsit, kumtaşı ve kuvars kumu cevherleri olarak yer kabuğunda yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Çok geniş bir yelpazede birçok endüstri için (Cam, elektronik, metalürji, yapı, seramik vb.) hammadde kaynağı olan bu cevherlerin fiziksel, mineralojik ve kimyasal özellikleri kullanımında belirleyici unsurlardır. Özellikle kuvarsit, kum taşı ve kuvars kumu cevherlerinin bileşiminde bulundukları safsızlıklardan (kil, demir, titan, feldspat, mika vb.) arındırılması teknolojik bir zorunluluktur. Bu sebepten dolayı, bu cevherlerin en uygun standartlara getirilmesi için cevher hazırlama ve zenginleştirme prosesleri kullanılmaktadır (Platias vd., 2014).

Örneğin bir cam kumu üretim tesisinde, gerek arzu edilen boyut standartını ( $-0,5+0,1$  mm) sağlamak gerekse de doğal çimento malzemeleriyle bağlanmış kuvars tanelerinin ve fiziksel olarak bağlanmış safsızlıkların serbest hale getirilmesi amacıyla ilk olarak boyut küçültme (kırama, öğütme) ve boyut göre sınıflandırma işlemleri uygulanmaktadır. Uygun boyut özelliği sağlandıktan sonra, özgül ağırlık farkına göre ve manyetik ayırma ile zenginleştirmeyi kapsayan fiziksel yöntemler veya minerallerin fiziko-kimyasal özellik farklılığına göre zenginleştirilmesini sağlayan flotasyon yöntemi yaygın bir şekilde uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca daha nitelikli cam kumu üretiminde silikatların yapısında bulunan safsızlıkların asit ve alkali çözeltilerle çözündürülmesi esasına dayanan kimyasal zenginleştirme de alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır. Genel olarak cam kumu üretimi yapan bir tesisten, uygun kimyasal bileşime sahip  $-0,5+0,1$  mm boyut aralığında bir konsantr ile artık ve  $-0,1$  mm boyutunda bir yan ürün elde edilmektedir. Yaklaşık olarak zenginleştirme tesisine beslenen ham cevherin %20-25 (cevherin kırılma ve öğünebilme özelliklerine bağlı olarak değişir) miktarını oluşturan bu yan ürün çoğunlukla ince boyutlu silikatlar, kil ve diğer safsızlıkları (Fe, Ti, Cr vb.) içerebilmektedir.

Yüksek  $\text{SiO}_2$  içeriği ve boyutundan dolayı bu ürün bazı endüstrilerde (yapı sanayii, gaz beton üretimi ve seramik sanayii vb.) kullanılabilir olmasına karşın çok yüksek katma değere sahip olamamaktadır. Çünkü, çoğu zaman tesisin bulunduğu coğrafyaya bağlı olarak bu ürünün nakliye masrafları satış fiyatlarını oldukça yüksek seviyelere çekmekte ve ekonomik cazibesini azaltmaktadır. Böyle bir durumun oluşması, orta-

ya çıkan bu ürünün düzenli depolanmasını gerekli kılmaktadır. Bu da tesisteki depolama alanı gereksinimini ve depolama masraflarını arttırmakta, işletmeye ilave bir maliyet olarak geri dönmektedir. Ayrıca bölgedeki çevresel hassasiyeti de etkilemektedir. Gerçekleştirilecek sürdürülebilir bir üretim için, oluşan bu yan ürünlerin değerlendirilerek katma değerinin yükseltilmesi gereklidir.

Cam kumu zenginleştirme tesislerinde ortaya çıkan bu yan ürünün küçük boyutlarda olması ve bileşimindeki yüksek silika oranı, kuvarsın mikronize ürün olarak farklı endüstrilerde (boya, seramik vb.) kullanımını mümkün kılmakta, ancak katma değerinin artırılması için bir takım zenginleştirme yöntemlerinin uygulanmasını gerektirmektedir. Bu yöntemlerin seçimi ürünün yapısında bulunan istenmeyen safsızlıkların miktarı ve bulunuş şekli ile yakından ilgilidir. Uzaklaştırılması gerekli olan bu safsızlıklardan en önemlisi kil mineralleri olup, sahip oldukları çok küçük tane boyutlarından dolayı (1-10 mikron) uygulanacak bir boyuta göre sınıflandırma işlemi ile kolayca uzaklaştırılabilecektir. Ayrıca, cam sanayii dâhil olmak üzere hemen hemen her sektörde silika kaynağı hammaddelerin pazarını belirleyen en önemli faktörlerden biri bileşimindeki demirli bileşikler olup, uzaklaştırılması gerekmektedir (Haus vd. 2012). Kabul edilebilir ölçüde beyazlığa (%90 ISO) ulaşmak için demir içeriği %0,1'in altına indirilmek istenmektedir (Lee vd., 2007). Daha nitelikli ve özel ürünler elde edilmesi (özel kristal cam, optik fiber, elektronik sanayii hammadesi vb.) için bu değerlerin daha düşük değerlerde (1-300 g/t değerleri arasında) olması arzu edilmektedir. (Platias vd., 2014; Akçıl vd., 2007).

Genel olarak, kullanıldığı alanda renk yapıcı bir safsızlık olan demirli bileşikler cam ürünler için saydamlığı azaltırken, optik fiberlerde iletim özelliğini azaltmaktadır. Ayrıca, demir varlığı silikon karbit, sodyum silikat, silikon metal gibi saf silis ürünlerinin kalitesini düşürmektedir (Veglio vd., 1998).

Kimyasal zenginleştirme kapsamında, farklı asitler kullanılarak çözündürme (liç) işlemi yapılmaktadır. Literatürde, inorganik ve organik asitlerin kullanıldığı pek çok çalışma mevcuttur. İnorganik asitlerden sülfürik ve hidroklorik asitler denenmiş, fakat maliyet, ürünün sülfat ve klor iyonlarının kirlenmesi ve liç sonrası elde edilecek çözelti için çevresel kaygılar duyulması sebebiyle, çalışmaların büyük bir kısmı organik asitler üzerine yoğunlaşmıştır. Organik asit kullanımında demir çözünme hızı ve verimi daha yüksek olup, geniş bir pH aralığında çalışma imkanı sağlamaktadır.

Organik asitlerden asetik, formik, sitrik, askorbik asitler denenmesine rağmen, demir oksitlerin liçinde en verimli sonuçlar oksalik asit ile elde edilmiştir (Lee vd., 2007; Akçıl vd., 2007; Du vd., 2011). Literatürde, demirin kuvars kumundan oksalik asit liçi ile uzaklaştırılmasına yönelik bazı çalışmalar bulunmaktadır. Yaklaşık %0,03 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerikli farklı kuvars kumlarının saflaştırılmasında; asit konsantrasyonu, pH, sıcaklık ve liç süresinin etkilerini inceleyen Ubaldini vd. (1996), Taxiarchou vd. (1997) ve Veglio vd. (1999), sırasıyla %46, %40 ve %99 Fe uzaklaştırma verimlerine ulaşmışlardır. Ayrıca, Bayat vd. (2004) oksalik asit kullanarak 80°C sıcaklıkta ve 90 dk. süre sonunda Fe içeriğini %0,1'den %0,01'e düşürmüştür.

Oksalik asidin liç aşamasında etkin bir reaktif olmasının yanısıra, işlem gören malzemenin kirlenmesi açısından da risk oluşturmaması, avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, oksalik asit kullanılarak çözüldürülen demirin, demir oksalat formunda çöktürüldükten sonra kalsinasyon işlemi ile saf hematite dönüştürülmesi olanağı bulunmaktadır (Taxiarchou vd., 1997).

Uzaklaştırılması istenen demirin cevher içindeki mineralojik bileşimi, asidik ortamlarda çözünme davranışını etkilediğinden, büyük bir öneme sahiptir. Hematit yavaş çözünürken, götit ve lepidokrosit gibi demir hidroksit ve oksihidroksit bileşikler daha hızlı çözünmektedirler. Çözünme işlemi pH kontrolünde gerçekleştiğinden, manyetit ve götitin oksalik asit liçinde en yüksek çözünme verimine pH 2,5-3,0 aralığında ulaşılmaktadır (Lee vd., 2007). Bu pH bölgesinin dışında ise çözünme verimlerinde ciddi bir düşüşün gözlemlendiği belirtilmiştir (Cornell and Schindler, 1987; Panias vd., 1996). Oksalik asit konsantrasyonunun fazlalığında ise özellikle killi malzemelerde, demirin çözünmesi olumsuz etkilenmektedir.

pH'nın 1,2'nin altında olduğu koşullarda oksalik asit H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> formunda bulunurken, pH 2,5-3,0 aralığında HC<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>-</sup> formunda bulunmaktadır. pH 4'ün üzerindeki değerlerde ise C<sub>2</sub>O<sub>4</sub><sup>-2</sup> bileşiği gözlenmektedir. Fe (III) oksalat ve Fe (II) oksalat oluşumu da çözüldürülen oksalik konsantrasyonuna ve pH değerine bağlıdır (Panias vd., 1996). Liç esnasında en uygun pH değeri seçilerek demir oksalat çökmesinin önüne geçilmektedir.

Oksalik asit çözüldürülmesinde demir oksitlerin çözünmesi reaksiyonu 1 nolu eşitlikteki gibi gerçekleşmektedir:



Çözünme işlemi üzerindeki en önemli belirleyici etkenler; oksalik asit konsantrasyonu ve optimum pH ile birlikte demir oksit bileşiğinin mineralojisi olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında; mevcut cam kumu zenginleştirme tesislerinden elde edilen ince boyutlu ve yüksek silis içerikli yan ürünün bileşimindeki safsızlıkların (kil ve demirli bileşikler) uzaklaştırılarak, daha yüksek kalitede kuvars eldesi amaçlanmıştır. Bu şekilde üretilecek yüksek saflıktaki silika konsantrasyonu hem ekonomik anlamda yararlar sağlayacak hem de bu tür düşük katma değeri olan yan ürünlerin depolama sorununu ortadan kaldırarak ortaya çıkabilecek çevresel riskleri en aza indirecektir.

## 1. MALZEME VE YÖNTEM

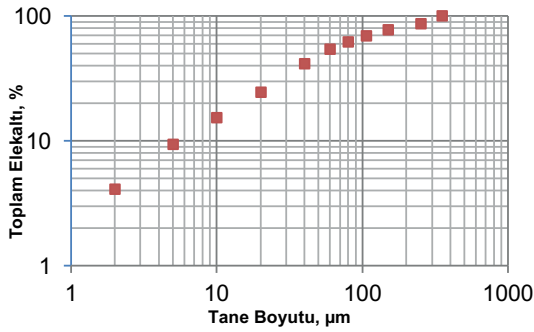
### 1.1. Malzeme

Cam kumu konsantrasyonu üretimi amacıyla faaliyet gösteren ve boyut küçültme, boyuta göre sınıflandırma ve sonrasında uygulanan kuru manyetik ayırma işlemlerini barındıran, Camış Madencilik A.Ş.'ye ait Karabük ilindeki kuvarsit zenginleştirme tesisinden elde edilen yan ürün deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bu yan ürün yüksek silika içeriğinin yanı sıra, bileşimde kil ve demirli bileşikler safsızlık olarak bulundurmaktadır. Numunenin kimyasal analizleri Siemens SRS 300 X-Ray Floresans Spectrophotometer marka XRF (X-ray fluorescence) cihazı ile gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Numunenin kimyasal özellikleri

| Bileşim                        | İçerik, % |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 95,80     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,30      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,32      |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,31      |
| CaO                            | 0,03      |
| MgO                            | 0,10      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,02      |
| K <sub>2</sub> O               | 0,47      |
| Kızdırma Kaybı                 | 0,65      |

Gerçekleştirilen kimyasal analiz sonucunda, malzemenin %95,8 SiO<sub>2</sub> içeriğinin yanı sıra, yapısındaki kilin varlığından dolayı %2,3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerdiği, renk yapıcı minerallerden kaynaklı olarak %0,32 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %0,31 TiO<sub>2</sub> bulunduğu ortaya çıkmıştır. Küçük boyutlu bir silika konsantresinin farklı sektörlerde kullanımını belirleyen önemli bir unsur da sahip olduğu boyut özelliği olmaktadır. Bu sebepten dolayı, bu ürünün boyut dağılımının tespit edilmesi için Malvern marka boyut ölçüm cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Numunenin tane boyut dağılımı

Yapılan boyut ölçümleri sonucunda zenginleştirme deneylerinde kullanılacak numunenin d<sub>80</sub> boyutunun yaklaşık 170 mikron, d<sub>50</sub> boyutunun ise 50 mikron civarında olduğu tespit edilmiştir. Mikronize kuvars ürünlerinin satışlarında boyut önemli bir faktör olmakla birlikte belirli bir boyut dağılımına sahip olması gerekmektedir. Ekonomik anlamda mikronize kuvarsa olan talep ve satış fiyatı, boyutun küçülmesi ile artmaktadır. Fakat bu çalışma kapsamında, cam kumu tesisinden elde edilen yan ürün orijinal boyutu ile zenginleştirme deneylerinde kullanılmıştır.

## 1.2. Yöntem

Deneysel çalışmalarda öncelikle, yan ürünün bileşimindeki kil minerallerinin uzaklaştırılması amacıyla özgül ağırlık farkına göre zenginleştirme yapan Multi Gravite Ayırıcısı (MGS) kullanılmıştır. Santrüfuj kuvvetinin etkisinden yararlanarak kil uzaklaştırmanın hedeflendiği MGS deneylerinde pülpde katı oranı %15, besleme miktarı ise 2 L/dk olarak seçilmiştir. Kil uzaklaştırma deneyleri sonrasında elde edilen silikat konsantresinin içerisindeki demirli bileşiklerin uzaklaştırılması

amacıyla da oksalik asit liçi deneyleri yapılmıştır. Bu kapsamda; a) liç süresine bağlı olarak oksalik asit konsantrasyonunun etkisi, b) sürenin ve sıcaklığın demir çözünme verimi üzerindeki etkisi ve liç kinetiği incelenmiştir. Liç deneylerinde katı/sıvı oranı 1/4 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karıştırma liçi deneyleri, 0,5 L silindirik cam reaksiyon hücrelerinde, anlık sıcaklık ölçümlerinin yapıldığı manyetik karıştırıcılarda 500 dev/dk dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Liç çözeltileri oksalik asit (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) kullanılarak hazırlanmıştır. Çözündürme deneyleri sonunda çözeltide yapılan kimyasal analizler AAS (atomik absorpsiyon spektroskopisi) ile yapılmıştır. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla da ayrıca liç keklerinin Siemens SRS 300 X-Ray Floresans Spectrophotometer marka XRF (X-ray fluorescence) cihazı ile analizleri yapılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA

### 2.1. MGS ile Kil Uzaklaştırma Deneyleri

Kimyasal bir zenginleştirme işlemi ile düşük demir içerikli bir silika konsantresi üretiminde, birincil olarak yan ürünün bileşimindeki kil minerallerin uzaklaştırılması önemli bir adımdır. Bu amaçla deneysel çalışmalara esas olan yan ürün üzerinde Multi Gravite Ayırıcısı (MGS) ile zenginleştirme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Yan ürün bileşiminde, çok küçük tane boyutuna sahip olan (1-10 mikron) kil minerallerin yanı sıra belli oranda çok küçük boyutlarda kuvars taneleri de bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı çok ince boyuttaki bu silikatların yerçekimi ve hidrodinamik kuvvetlerden minimum düzeyde etkilenip artık olarak kil ile birlikte hareket etmemesi amacıyla, eğim 0° (yatay) ve yıkama suyu 1 L/dk olarak alınmıştır. Daha temiz bir artık (kil mineralleri) atmak amacıyla ayrıca en yüksek tambur hızında (280 dev/dk) çalışmalar gerçekleştirilmiştir. %15 pülpde katı oranı ve 2 L/dk pülp besleme hızı ile yürütülen kil uzaklaştırma deneyi sonuçları Çizelge 2'de verilmektedir.

Çizelge 2'den inceleneceği üzere; MGS ile boyuta ve niteliğe göre bir zenginleştirme işleminin gerçekleştiği Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> içeriklerinden açıkça görülmektedir. Toplam alüminanın %82,9'lık kısmı hafif ürün olarak %17,65 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile elde edilmekle birlikte, toplam silikatların %84,8'i ise ağır üründen %98,99 SiO<sub>2</sub> içeriği ile alınmıştır.

Çizelge 2. MGS ile kil uzaklaştırma deneyi sonuçları

| Ürünler       | Miktar (%)   | İçerik, %                      |                                |                  |                  | Dağılım, %                     |                                |                  |                  |
|---------------|--------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|
|               |              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> |
| Ağır Ürün     | 81,9         | 0,51                           | 0,12                           | 98,99            | 0,26             | 15,3                           | 31,7                           | 84,9             | 67,5             |
| Ara Ürün      | 5,4          | 0,89                           | 0,35                           | 89,30            | 0,42             | 1,8                            | 6,1                            | 5,1              | 7,2              |
| Hafif Ürün    | 12,7         | 17,65                          | 1,51                           | 75,53            | 0,63             | 82,9                           | 62,2                           | 10,0             | 25,3             |
| <b>Toplam</b> | <b>100,0</b> | <b>2,72</b>                    | <b>0,31</b>                    | <b>95,49</b>     | <b>0,32</b>      | <b>100,0</b>                   | <b>100,0</b>                   | <b>100,0</b>     | <b>100,0</b>     |

Ayrıca deney sonuçlarından, kil minerallerinin uzaklaşması ile birlikte demirin de büyük oranda uzaklaştığı (%68,3'ü) ve elde edilen silika konsantrisinde Fe içeriğinin %0,12 değerine düştüğü görülmüştür.

## 2.2. Oksalik Asit Liçi ile Demir Uzaklaştırma Deneyleri

MGS ile kili uzaklaştırılmış, %98,99 SiO<sub>2</sub> ve %0,12 Fe içeriğine sahip silika konsantrinden demirli bileşiklerin uzaklaştırılarak safa yakın bir ürün elde etmek amacıyla oksalik asit liçi deneyleri yapılmıştır. Bu amaçla farklı liç sürelerinde oksalik asit konsantrasyonunun demir çözünme verimine etkisi ortaya koyulmuştur. Ayrıca liç süresi ve sıcaklığa bağlı olarak demir çözünmesindeki değişim incelenerek liç kinetiği çıkarılmıştır.

### 2.2.1. Farklı Liç Sürelerinde Oksalik Asit Konsantrasyonunun Etkisi

Liç deneyleri aşağıda verilen şartlar altında yürütülmüş ve ilk olarak oksalik asit konsantrasyonunun etkisi incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

#### Deney Koşulları

- 1/4 katı/sıvı oranı.
  - 80°C sıcaklık.
  - 500 dev/dk karıştırma hızı.
  - 0,5, 1, 2 ve 4 saat liç süreleri için 0,05 M, 0,1 M, 0,2 M, 0,4 M ve 0,6 M oksalik konsantrasyonları.
- Şekil 2'de verilen sonuçlara göre, demir çözünmesini 3 gruba ayırıp yorumlamak mümkündür. Birinci grup, ilk 1 saati kapsamakta olup, bu süre içerisinde demir çözünme

verimlerinde çok hızlı bir artış gözlenmektedir. İkinci grup, 1-2 saat arasını temsil etmekte ve demir çözünme hızının yavaşladığı anlaşılmaktadır. Son olarak üçüncü grupta ise (2-4 saat), hemen her oksalik asit konsantrasyonu için demir çözünmesinde azalan bir artış olduğu izlenmektedir.

Elde edilen sonuçlardan, 0,4 ve 0,6 M oksalik konsantrasyonlarında 2 saat liç süresinden itibaren demir çözünme işleminin yaklaşık %63 çözünme verimiyle tamamlandığı söylenebilir. Her iki konsantrasyonda ulaşılan değerler birbirine çok yakın olduğundan, 0,4 M oksalik asit konsantrasyonunun en uygun olduğu kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, 0,4 ve 0,6 M oksalik konsantrasyonlarında 2 saat liç süresinden itibaren demir çözünme işleminin yaklaşık %63 çözünme verimiyle tamamlandığı söylenebilir.

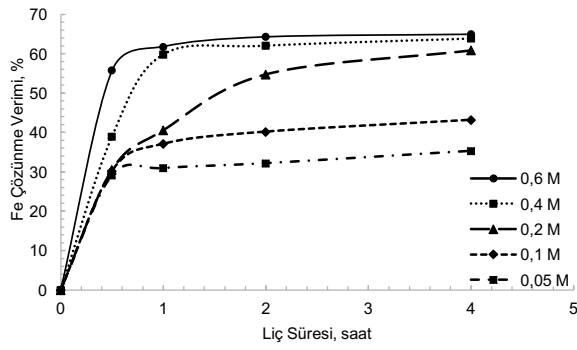
### 2.2.2. Liç süresi ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Demir Çözünme Veriminin Değişimi ve Liç Kinetiği

Asitli ortamda metallerin çözünmesine yönelik çeşitli yaklaşım ve modeller bulunmaktadır. Genellikle, küçülen çekirdek modeli önerilmekte olup, bu modele göre liç süresi geçtikçe çekirdek küçülmekte, katı tanecikte bulunan reaksiyona girmemiş ve giren ürünlerden oluşan gözenekli bir tabakanın büyümesi gerçekleşmektedir (Levenspiel, 1999).

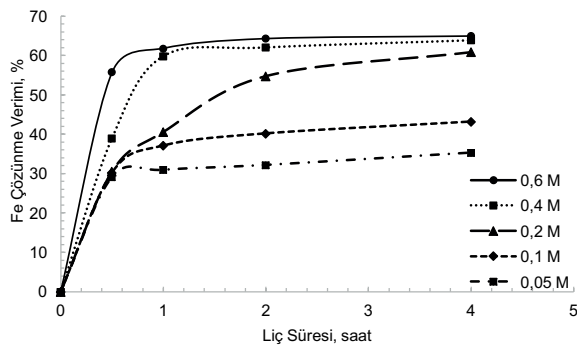
Demir çözünme kinetiğini belirlemek amacıyla sıcaklık-süre ilişkisini temel alan bir dizi çözündürme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Deneyler 1/4 K/S oranı ve 0,4 M oksalik asit konsantrasyonunda yapılmış olup 15, 30, 60 ve 120 dakika sürelerde 40, 60 ve 80°C sıcaklıklarının ilişkisi incelenmiştir (Şekil 3).





Şekil 2. Oksalik asit konsantrasyonunun demir çözünmesi üzerine etkisi (1/4 K/S oranı, 80°C sıcaklık)



Şekil 3. Demir çözünmesinde sıcaklık-süre ilişkisi (1/4 K/S oranı, 0,4 M oksalik asit)

Şekil 3'te verilen demir çözünme verimlerine göre, sıcaklığın, demir çözünmesi üzerinde hızlandırıcı bir etkisinin olduğu anlaşılmaktadır.

Elde edilen çözünme verimleri, küçülen çekirdek modeli kapsamındaki denklemlere uyarlanmıştır. Denklem (2.1) film tabakası difüzyonu, Denklem (2.2) gözenekli tabaka difüzyonu ve Denklem (2.3) ise kimyasal reaksiyon kontrolündeki yaklaşımları göstermektedir.

$$x = kt \quad (2.1)$$

$$1-3(1-x)^{2/3} + 2(1-x) = kt \quad (2.2)$$

$$1-(1-x)^{1/3} = kt \quad (2.3)$$

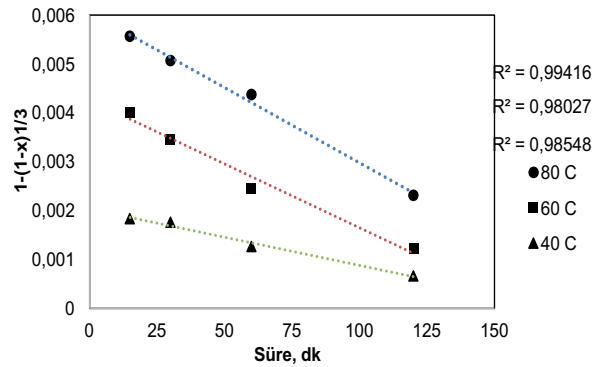
Burada x, çözünen metali; k, hız sabitini; t ise süreyi temsil etmektedir. Hesaplanan hız sabitlerinden hareketle, Arrhenius denklemi uyarınca aktivasyon enerjisi belirlenebilmektedir.

Denklem (2.4)'te Ea, aktivasyon enerjisi; R, ideal gaz sabiti; k<sub>0</sub> ekponensiyel faktör ve T ise sıcaklıktır.

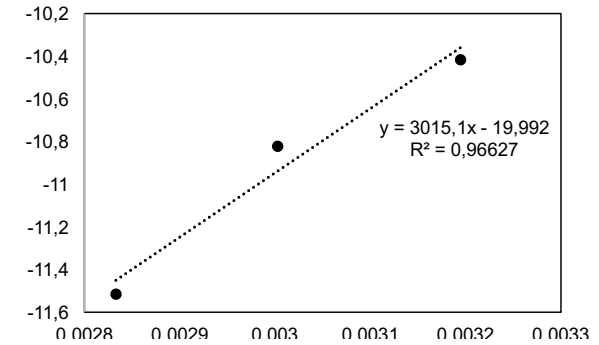
$$k = k_0 e^{-Ea/RT} \quad (2.4)$$

Yapılan hesaplamalara göre, en yüksek korelasyon katsayıları Denklem (3)'te verilen kimyasal reaksiyon kontrolünde yaklaşık 0,99 olarak belirlenmiştir. Ulaşılan bu değer, modele uygunluk açısından ciddi bir tutarlılık göstermektedir (Şekil 4). Havlik (2008)'e göre, kimyasal reaksiyon kontrolünde gerçekleşen çözünmeler büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olmaktadır.

Şekil 4'te elde edilen verilere göre, 40-80°C sıcaklıkları arasında demir çözünmesinin kimyasal modele uyduğu görülmüş ve aktivasyon enerjisinin hesaplanması amacıyla Arrhenius grafiği çizilmiştir (Şekil 5). Buradan demir çözünmesi için aktivasyon enerjisi 25,07 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4. Farklı sıcaklıklarda oksalik asit liçi ile elde edilen kimyasal model



Şekil 5. Oksalik asit ortamında demir çözünmesi için Arrhenius grafiği

## SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, bir cam kumu tesisi yan ürününün ekonomik anlamda katma değerinin artırılması amacıyla zenginleştirme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir;

- Deneysel çalışmalarda kullanılan yan ürün %95,8 SiO<sub>2</sub> içeriği yanı sıra, yapısındaki kilin varlığından dolayı %2,3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermektedir. Ayrıca renk yapıcı minerallerden kaynaklı olarak %0,32 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %0,31 TiO<sub>2</sub> içeriği ile diğer metal safsızlıkları barındırmaktadır.

- Gerçekleştirilen boyut analizi sonucunda numunenin d<sub>80</sub> boyutunun yaklaşık olarak 170 mikron, d<sub>50</sub> boyutunun ise 50 mikron civarında olduğu tespit edilmiştir.

- MGS ile gerçekleştirilen kil uzaklaştırma deneyinde, boyuta ve niteliğe göre bir zenginleştirme işleminin gerçekleşmektedir. Toplam alüminanın %82,9'luk kısmı hafif ürün olarak %17,65 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile elde edilmiş olup, toplam silikatların %84,8'i ise ağır üründen %98,1 SiO<sub>2</sub> içeriği ile elde edilmiştir. Ayrıca deney sonuçlarından, kil minerallerinin uzaklaşması ile birlikte demirin de büyük oranda uzaklaştığı (%68,3'ü) ve elde edilen silika konsantrisinde Fe içeriğinin %0,12 değerine kadar düştüğü görülmüştür.

MGS ile kili uzaklaştırılmış, %98,99 SiO<sub>2</sub> ve %0,12 Fe içeriğine sahip silika konsantrisinde demirli bileşiklerin uzaklaştırılarak safa yakın bir silika elde etmek amacıyla gerçekleştirilen oksalik asit liçi deneyleri sonucunda; 0,4 M oksalik konsantrasyonu, 1/4 K/S oranı, 80°C sıcaklık ve 2 saat liç süresi şartları altında, demirin yaklaşık %63'ü uzaklaştırabilmiştir. Bu sonuçla, %99,16 SiO<sub>2</sub>, %0,04 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %0,53 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %0,12 TiO<sub>2</sub> içeren bir silika konsantrisi elde edilmiştir

- Oksalik asit ile liç deneylerinde ayrıca, demir çözünmesi, sıcaklık ve süreye bağlı olarak incelenmiş ve çözünmenin kimyasal reaksiyon kontrolünde gerçekleştiği belirlenmiştir. Arrhenius grafiğinden elde edilen verilerden hareketle de, demir çözünmesi için aktivasyon enerjisi 25,07 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

- Gerçekleştirilen zenginleştirme deneyleri sonunda elde edilen gerek boyut özelliği, gerekse kimyasal bileşimi dolayısıyla (%99,16 SiO<sub>2</sub>; %0,04 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; %0,53 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) mikronize kuvars olarak farklı endüstrilerde (boya, seramik vb.) kullanılabilir özelliktedir. Ayrıca bu ürün daha küçük boyutlara (<0,053 mikron) indirilerek daha yüksek katma değerli ürün olarak satış imkanı bulabilecektir. Bunun yanı sıra kil uzaklaştırma deneyleri sonunda elde edilen ve ağırlıklı olarak kil minerallerinden oluşan MGS artığı %17,65 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği ile seramik sanayinde kil reçetelerinde kullanılabilir özellikte olup, ekonomik bir değere sahiptir.

Gerçekleştirilen bu çalışma sonunda elde edilen bulgular ile cam kumu zenginleştirme tesisinden elde edilen ince boyutlu yan üründen ilk aşamada Multi Gravite Ayırıcısı ile kil minerallerinin uzaklaştırılması ve elde edilen ön konsantrenin uygulanacak bir oksalik asit liçi ile demirli bileşiklerinden arındırılmış farklı sektörler için uygun nitelikli bir mikronize silika konsantrisinin üretimi mümkün olmaktadır. Bunun yanı sıra, oksalik asit liçi ile çözündürme deneylerinde, çözündürmeye etki eden parametrelerin (katı/sıvı oranı, tane boyutu, oksalik asit konsantrasyonu, sıcaklık, ortam pH değeri ve çözündürme süresi) optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmesi daha nitelikli ürünlerin elde edilmesi açısından önemli katkılar sağlayabilecektir. Ayrıca diğer önemli bir unsur ise, elde edilen liç çözeltisinin tekrar kullanılabilmesine yönelik detaylı "çözelti saflaştırma" çalışmalarının yapılması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

CAMİŞ Madencilik A.Ş.'ne değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Akçıl, A., Tuncuk, A., Devenci, H., 2007. Kuvarsın Saflaştırılmasında Kullanılan Kimyasal Yöntemlerin İncelenmesi. Madencilik, 46 (4), 3-10.
- Bayat, O., Arslan, V., Vapur, H., 2004. Kuvars Kumu Kristallerinin Oksalik Asit Liçi ile Uzaklaştırılması. 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye.
- Cornell, R. M., Shcindler, P. W., 1987. Photochemical Dissolution of Goethite in Acid/Oxalate Solution. Clays Clay Mineral, 35, 347-352.
- Du, F., Li, J., Li, X., Zhang, Z., 2011. Improvement of Iron Removal from Silica Sand Using Ultrasound Assisted Oxalic Acid. Ultrasonics Sonochemistry, 18, 389-393.
- Haus, R., Prinz, S., Priess, C., 2012. Assessment of High Purity Quartz Resources. J. Götze and R. Möckel (eds.), Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics, Springer Geology, DOI: 10.1007/978-3-642-22161-3\_2.
- Havlık, T., 2008. Hydrometallurgy-Principles and Applications. Cambridge International Science Publishing Limited in association with Woodhead Publishing Limited.

- Lee, S. O., Tran, T., Jung, B.H., Kim, S.J., Kim, M.J., 2007. Dissolution of Iron Oxide Using Oxalic Acid. *Hydrometallurgy*, 87, 91-99.
- Levenspiel, O., 1999. *Chemical Reaction Engineering*. Wiley, New York.
- Panias, D., Taxiarchou, M., Paspaliaris, I., Kontopoulos, A., 1996. Mechanisms of Dissolution of Iron Oxides in Aqueous Oxalic Acid Solutions. *Hydrometallurgy*, 42, 257-265.
- Platiasa, S., Vatalisa, K. I., Charalampidesa, G., 2014. Suitability of Quartz Sands for Different Industrial Applications. *Procedia Economics and Finance*, 14, 491 – 498
- Taxiarchou, M., Panias, D., Douni, I., Paspaliaris, I., Kontopoulos, A., 1997. Removal of Iron from Silica Sand by Leaching with Oxalic Acid. *Hydrometallurgy*, 46, 215-227.
- Tülümen, E., 1985. Anadolu Cam Sanayii A.Ş. Hammaddeleri. T.Ş.C.F A.Ş. Araştırma Müdürlüğü Raporu No:178, İstanbul.
- Ubal dini, S., Piga, L., Formari, P., Massidda, R., 1996. Removal of Iron from Quartz Sands: A Study by Coloumn Leaching Using a Complete Factorial Design. *Hydrometallurgy*, 40, 4369-379.
- Veglio, F., Passariello, B., Barbaro, M., Plescia, P., Marabini, A. M., 1998. Drum Leaching Tests in Iron Removal from Quartz Using Oxalic and Sulfuric Acids. *International Journal of Mineral Processing*, 54, 183-200.
- Veglio, F., Passariello, B., Abbruzzese, C., 1999. Iron Removal Process for High Purity Silica Sands Production by Oxalic Acid Leaching. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 38, 4443-4448.



Orijinal Araştırma / Original Research

## YÜRÜYEN TAHKİMAT ÜNİTELERİNDE TAVAN TABAKASI İLE TAVAN SARMASI TEMASLARINDA YÜK ANALİZİ

LOAD ANALYSIS OF POWERED ROOF SUPPORT UNITS IN SUPPORT AND STRATA INTERACTION

Mustafa Emre Yetkin<sup>a,\*</sup>, Ferhan Şimşir<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü İzmir/Türkiye

Geliş Tarihi / Received : 05 Ekim / October 2017  
Kabul Tarihi / Accepted : 01 Şubat / February 2018

### ÖZ

**Anahtar Sözcükler:**  
Uzunayak,  
Yürüyen tahkimat ünitesi,  
Yük analizi.

Tahkimat oluşturma hızının kazı hızına ulaşmasıyla beraber ilk olarak 1950'li yıllarda geliştirilen yürüyen tahkimatlar günümüzde uzunayak madenciliğinin en önemli ekipmanı haline gelmiştir. Uzunayaklarda yürüyen tahkimat ünitesinin etkili bir şekilde tavanı desteklemesi için tavan sarmasının tavan tabakaları ile tamamen temas halinde olması gerekmektedir. Ancak bazı durumlarda düzensiz tavan yüklemeleri, taban taşının yumuşak olması ve göçük tarafından gelen ek yüklerin etkisiyle tavan sarması tavan tabakası ile tamamen temas halinde olmamaktadır.

Bu çalışmada, tavan sarması ve tavan tabakasının farklı temas durumlarında yürüyen tahkimat ünitesinin taşıyıcı elemanlarında meydana gelen maksimum gerilmeler hesaplanmış ve yürüyen tahkimat ünitesinin çalışma verimi değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan dört farklı temas durumuna göre tahkimat ünitesinin en verimli çalışma durumunu tavan sarması ile tavan tabakasının tamamen temas halinde olması durumunda sağladığı görülmüştür.

### ABSTRACT

**Keywords:**  
Longwall,  
Powered roof support unit,  
Load analysis.

Today, powered roof supports that are designed in 1950s have become the most important equipment in longwall mining once supporting speed reached the excavation speed. In order to support the roof efficiently by the support unit, the canopy has to be in full contact with the roof strata in longwalls. But in some cases, such as irregular roof loadings, soft footwall, and loads coming from gob, canopy and roof strata can not be in full contact.

In this study, maximum stresses occurring on support unit parts are calculated in different contact states between canopy and roof strata and the working efficiency of roof support units are evaluated. According to the four different contact situations designed in the scope of the study, it is seen that the powered roof support unit provided the most efficient working condition in the full contact state between canopy and roof strata.

\* Sorumlu yazar: [mustafa.yetkin@deu.edu.tr](mailto:mustafa.yetkin@deu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-4797-3841>

\*\* [ferhan.simsir@deu.edu.tr](mailto:ferhan.simsir@deu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-6528-7781>

## GİRİŞ

Hızla gelişen maden makineleri sanayiinde, yürüyen tahkimatlarla ilgili iki önemli gelişme dönemi söz konusudur. İlk gelişme 1950'lerde modern yürüyen tahkimat türlerinin kullanılmaya başlanması, ikincisi ise 1970'lerde lemniskat tip ve dam-kalkan (chock-shield) tipi tahkimatların kullanıma girmesidir. Genel amaçlı yürüyen tahkimat çeşitleri oldukça fazla olmasına rağmen, genel olarak bunları dam, kaliper ve lemniskat olmak üzere üç kategoride sınıflandırmak mümkündür. Kaliper tahkimatlarda tavan kalkanı göçük kalkanına pivot mafsallarla bağlıdır. Göçük kalkanı da taban plâkasına başka bir mafsalla bağlıdır. Bu nedenle, tavan kalkanı yükselirken dairesel bir hareket yapar. Ayaktaki konverjans ve tavan kalkanı ile tavan kömürü arasındaki sürtünmeden dolayı bu dairesel hareket, tahkimat bağlantılarında ve hidrolik silindirlere kontrolsüz yük konsantrasyonlarına neden olur. Bunun yanı sıra hidrolik direkler göçük kalkanına bağlı olduğundan kalkanda bükülme gerilmelerine yol açar (Yetkin, 2016).

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda araştırmacılar yürüyen tahkimatlarla tavan tabakaları arasındaki etkileşimi araştırmışlardır. Bu çalışmalarda tavan tabakasıyla tavan sarmasının teması durumunda yürüyen tahkimat ünitesinin hidrolik direklerinde meydana gelen gerilmeler dikkate alınmış ve bu gerilme değerlerine göre uygun yürüyen tahkimat ünitesi kapasitesi önerilmiştir (Barczak, 1991; Barczak, 1992; Goshtasbi vd. 2006; Singh ve Singh, 2008; Trueman vd, 2009; Singh ve Singh, 2010; Akande ve Saliu, 2011; Verma ve Deb, 2013).

Bu çalışmada, yürüyen tahkimatlara etki eden yüklerin temelini oluşturan tavan yüklemelerinin oluşma şekilleri ve bu yüklemeler sırasında yürüyen tahkimat ünitesinin tavan sarması ile tavan tabakası arasında oluşan temas durumları incelenmiştir. SpaceClaim (2014) katı modelleme programı yardımıyla yürüyen tahkimat ünitesinin modeli oluşturulmuştur. Örnek model çalışması olarak 8 metre damar kalınlığına sahip bir uzunayağın yalancı tavan yüksekliği hesaplanmış ve bu tavan yüksekliğinde meydana gelmesi beklenen yük teorik olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan tavan yükü, tavan sarması ve tavan tabakasının etkileşimi dikkate alınarak farklı bölgelerden tavan sarmasına etki edecek şekilde ANSYS (2013) gerilme analizi programında yürüyen tahkimat ünitesinin tavan sarmasına uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, yürüyen tahkimat ünitesinin taşıyıcı elemanlarında meydana gelen

maksimum gerilmeler hesaplanarak, tavan sarmasının tavan tabakası ile farklı temas durumlarına göre yürüyen tahkimat ünitesinin çalışma verimliliği irdelenmiştir.

## 1. YÜRÜYEN TAHKİMATLARDA TAVAN YÜKÜNÜN HESAPLANMASI

Yürüyen tahkimat ünitesinin üzerine gelen tavan yükü, tavan sarması ve göçük sarması üzerine gelen yük olmak üzere iki kısımdan oluşur. Tavan sarması üzerine gelen yükün iki kaynağı vardır: tavan tabakasının ağırlığı ve tavan tabakasının yatay hareketleri sırasında oluşan arına paralel ve dikey olarak gelişen yanal kuvvetlerdir. Göçük sarması üzerine gelen yük ise, sarma üzerine yığılan göçmüş tavan tabakası parçalarının ağırlığıdır. Birçok araştırmacı özellikle tavan sarması üzerine gelen tavan tabakasının ağırlığından dolayı oluşan yükün hesaplanması üzerine yoğunlaşmıştır. Bu konu ile ilgili yayımlanmış çalışmalara göre, yürüyen tahkimat ünitesinin minimum taşıma kapasitesi damar kalınlığına bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir (Peng ve Chiang, 1984). Burada

$$P_{\min} = \gamma \cdot \frac{m}{K-1} \quad (1)$$

$P_{\min}$  = Tahkimat ünitesinin minimum taşıma kapasitesi (ton)

$\gamma$  = Tavan taşının ortalama yoğunluğu ( $t/m^3$ )

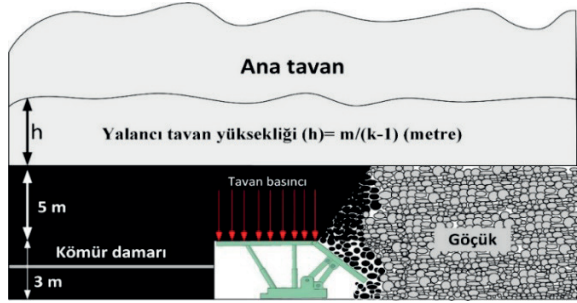
$K$  = Taşın hacimce kabarma katsayısı

$m$  = Çalışılan damarın kalınlığı (m) olarak verilmektedir.

## 2. MODEL ÇALIŞMASI

Yapılan çalışmada oluşturulan uzunayak modelinin görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. 8 metre damar kalınlığına sahip, tavan taşı  $2,50 t/m^3$  yoğunlukta bir marn ve kömür kabarma katsayısı 1,40 olan bir uzunayakta teorik olarak meydana gelmesi beklenen tavan basıncı eşitlik 1'de değerler yerine konulduğunda  $50 t/m^2$  olarak hesaplanır. Bu değer yaklaşık  $0,50 MPa$  tavan basıncına karşılık gelmektedir. Yük analizlerinde tavan basıncı  $0,50 MPa$ , göçük basıncı ise  $0,10 MPa$  olarak programa girilmiştir. Göçük basıncının hesaplanması sırasında Yetkin (2016)'da yapılan saha modellerinden elde edilen ve göçük içinde meydana gelen gerilmelerin ortalama değeri olan  $0,1 MPa$  dikkate alınmıştır.

Modelleme çalışmalarında gerilmelerin modellenmesi işlemi statik ve dinamik şartlarda olmak üzere iki durum temelli olarak yapılmaktadır. Her durumda kullanılması gereken bilgisayar yazılımları farklılık göstermektedir. Tavanda ve göçükte meydana gelen gerilmeler statik ortam şartlarında hesaplanmıştır. Gerilme analizlerinde arkadan kömür çekilmesi sırasında göçük sarmasına etki eden gerilmelerin değişken olduğu açıktır ancak yapılan bu çalışmada yüklerin değerlendirilmesi dinamik ortamda değil statik bir ortam üzerinde yapılmıştır. Tahkimat ünitesine etki eden yüklerin dinamik şartlar altında değerlendirilmesi konusu daha sonraki çalışmalarda ele alınabilir. Ancak bu çalışmanın temelini oluşturmamaktadır. Çalışmanın yapıldığı uzunayağa ait kömür ve çevre kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.



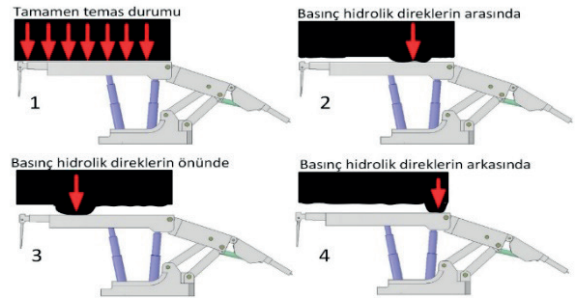
Şekil 1. Oluşturulan modelin görüntüsü

### 2.1. Tavan Sarması ve Taban Tabakası Arasındaki Temas Durumları

Çoğu zaman düzensiz tavan yüklemeleri, taban taşının yumuşak olması ve göçük tarafından gelen ek yüklerin etkisiyle tavan sarması tavan tabakası ile tamamen temas halinde

olmamaktadır. Bu durumlarda tavan sarması ve taban takası arasında farklı temas durumları meydana gelmektedir.

Yapılan çalışmada yukarıda bahsedilen etkiler dikkate alınarak tavan sarması ve tavan tabakası arasında dört farklı temas durumu oluşturulmuştur. Bu durumlar, tamamen temas durumu (Durum 1), temas bölgesinin hidrolik direklerin arasında olması durumu (Durum 2), temas bölgesinin hidrolik direklerin önünde olması durumu (Durum 3) ve temas bölgesinin hidrolik direklerin arkasında olması durumudur (Durum 4). Temas şekillerine göre oluşturulan modeller Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Tavan basıncının tavan sarmasına etki etme şekilleri

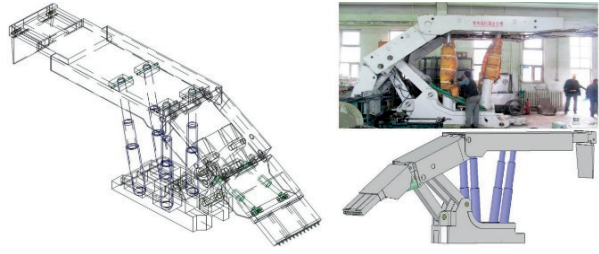
### 2.2. Yürüyen Tahkimat Ünitesinin Özellikleri ve Tahkimatın Katı Modeli

Çalışmada kullanılan ve model olarak seçilen yürüyen tahkimat ünitesi maksimum 3,5 metre çalışma yüksekliğine sahip çift zincirli konveyörlü kalkan tipi yürüyen tahkimattir. Farklı bölgelerden tavan sarmasına etki eden yükler altında tahkimat ünitesinde meydana gelen gerilmelerin

Çizelge 1. Kömür ve kömürü çevreleyen kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri (Destanoğlu vd. 2000; Ozfirat, 2007)

| Özellik   | Kil taşı    |                 |       | Kömür |
|---|-------------|-----------------|-------|-------|
|   | Tavan (Ana) | Tavan (Yalancı) | Taban |       |
| Birim hacim ağırlık (g) (MN/m <sup>3</sup> )        | 0,021       | 0,023           | 0,024 | 0,013 |
| Tek eksenli basınç dayanımı (s <sub>c</sub> ) (MPa) | 12,00       | 11,52           | 24,50 | 12,15 |
| Elastisite modülü (E <sub>i</sub> ) (MPa)           | 2785        | 1669            | 3204  | 1748  |
| Jeolojik dayanım indeksi (GSI)                      | 52          | 52              | 52    | 47    |

hesaplanabilmesi için SpaceClaim (2014) katı modelleme programı yardımıyla tahkimat ünitesinin orijinal ölçüleri dikkate alınarak katı model oluşturulmuştur. Tahkimat ünitesinin gerçek ve katı model görüntüsü Şekil 3'de verilmiştir. Tahkimat ünitesinin fiziksel özellikleri ve sıkılama-esneme basınç değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Yürüyen tahkimat ünitesi tavana sıkılandığında kontrol vanası ilk önce sıkılama pozisyonuna geçer ve direkler tavana değene kadar yükselmeye devam eder. Bu işlem sonradan direk yuvalarındaki basınçlı sıvı hızla artarak hidrolik pompaların çalışma basıncına ulaşır. Bu esnada kontrol vanası kapanır ve sıvı direk içerisinde kilitletlenir. Böylece basınçlı sıvı, pompaların çalışma basıncına ulaşmıştır. Bu işlem tahkimatın sıkılama basıncı olarak isimlendirilir. Direklerde meydana gelen sıkılama basınçlarının hidrolik direklerin iç alanı ve direk sayısı ile çarpımı ise sıkılama yükünü verir. Tavan alçalması ve tahkimat ünitesine binen yük gittikçe arttığında, hidrolik silindireleri ve pistonları hasardan korumak için maksimum kabul edilebilir basınç esneme basıncı olarak tanımlanır ve bu basınç her bir hidrolik direkte önceden ayarlanmıştır. Direklerde meydana gelen esneme basınçlarının hidrolik direklerin iç alanı ve direk sayısı ile çarpımı ise esneme yükünü verir. Sıkılma ve esneme durumlarında tahkimat ünitesinin maksimum taşıma yükünün tavan sarması alanına oranı (MPa) ise tahkimat dayanımı ifade eder (Yetkin, 2016).



Şekil 3. Yürüyen tahkimat ünitesinin gerçek ve katı model görüntüsü

### 2.3. Gerilme Analizi ve Sonuçlar

Çalışma kapsamında tasarlanan dört adet temas durumuna göre ANSYS (2013) gerilme analizi programında tahkimat ünitesinin tavan sarması üzerine farklı bölgelerden basınç uygulanmıştır.

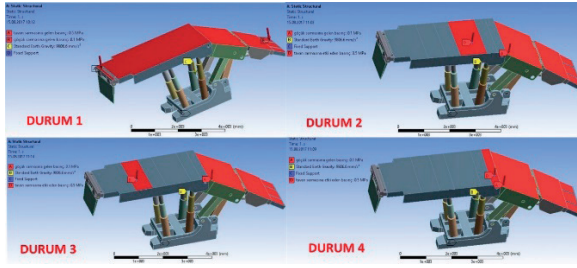
Durumlara göre basınçların uygulama bölgeleri Şekil 4'de verilmiştir. Temas durumlarına göre farklı bölgelerden tavan sarmasına etki eden basınçların etkisiyle tahkimat ünitesinin ön direklerinde, arka direklerinde ve ana göçük sarmasında meydana gelen maksimum gerilmeler ve farklı temas durumlarında yürüyen tahkimat ünitesinin tabanında oluşan reaksiyon kuvvetlerine göre tabanda meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3 ve Çizelge 4'de sunulmuştur. Göçük bölgesinde meydana gelen gerilmelerin program üzerinde ana göçük sarmasına uygulanması Şekil 5'de verilmiştir.

Çizelge 2. Ayak içi tahkimatının sıkılama ve esneme yükleri altındaki dayanımı

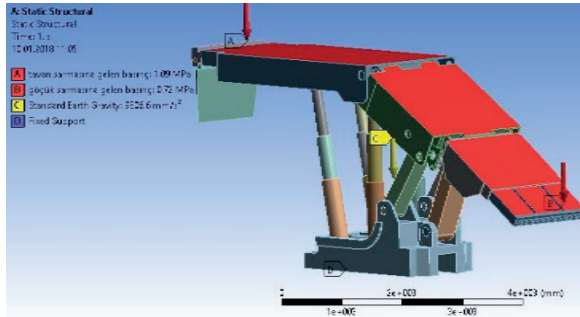
| Tahkimat türü             | Sıkılama ve esneme yükü | Çalışma yükleri |        | Tavan sarması |               |                         | Tahkimat dayanımı (MPa) | Hidrolik direk basınçları (MPa) |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|--------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
|                           |                         | kN              | Ton    | Uzunluğu (m)  | Genişliği (m) | Alanı (m <sup>2</sup> ) |                         |                                 |
| Ayak içi yürüyen tahkimat | Sıkılama yükü           | 6280            | 640,06 | 4,50          | 1,75          | 7,875                   | 0,81                    | 32                              |
|                           | Esneme yükü             | 7264            | 740,35 |               |               |                         | 0,94                    | 37                              |

Çizelge 3. Farklı temas durumlarında tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen maksimum gerilmeler

| Tahkimat elemanı  | Meydana gelen mak. gerilme (MPa) |         |         |         |
|-------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|
|                   | Durum 1                          | Durum 2 | Durum 3 | Durum 4 |
| Ön direkler       | 304,88                           | 54,21   | 65,09   | 17,93   |
| Arka direkler     | 12,86                            | 5,12    | 4,68    | 1,63    |
| Ana göçük sarması | 92,38                            | 82,39   | 84,34   | 80,70   |



Şekil 4. Farklı temas durumlarına göre tavan sarmasına etki eden basınç bölgeleri

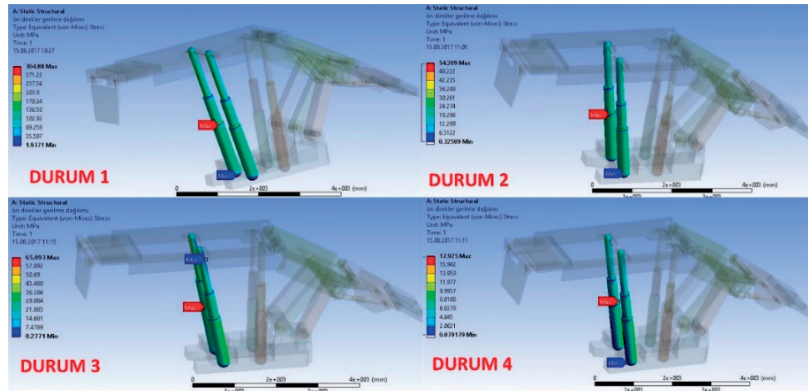


Şekil 5. Basıncın ana göçük sarmasına uygulanması

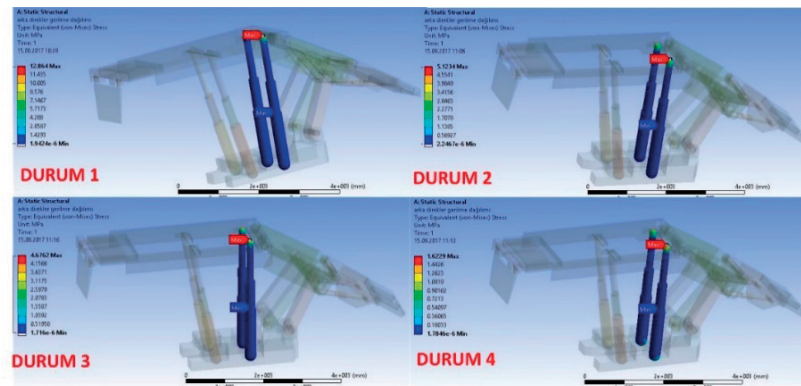
Çizelge 4. Farklı temas durumlarında yürüyen tahkimat ünitesinin tabanında meydana gelen gerilmeler

| Temas durumu | Tahkimat taban alanı (mm <sup>2</sup> ) | Reaksiyon kuvveti (N) | Tabana gelen gerilme (MPa) |
|--------------|---|-----------------------|----------------------------|
| 1            |   | 5.375.700             | 2,04                       |
| 2            | 2.638.637                               | 2.135.800             | 0,81                       |
| 3            |   | 1.421.300             | 0,54                       |
| 4            |   | 1.809.400             | 0,69                       |

Gerilme analizi sonrasında ön direklerde ve arka direklerde meydana gelen gerilmelerin görüntüsü Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Farklı temas durumlarında ön direklerde meydana gelen gerilmeler

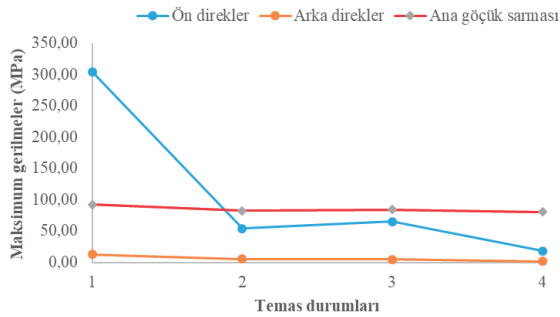


Şekil 7. Farklı temas durumlarında arka direklerde meydana gelen gerilmeler



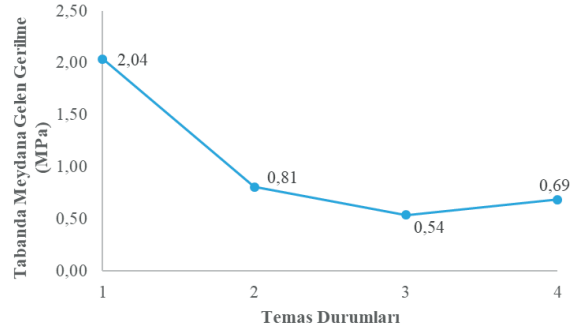
### 3.SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Şekil 8'de verilen grafiğe bakıldığında tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen en yüksek maksimum gerilmelerin 1.durumda meydana geldiği görülmektedir. 1. durumun tavan sarması ile tavan tabakasının tam temas hali olması dolayısıyla yük aktarımının en verimli şekilde olduğu düşünüldüğünde, bu durumun normal olduğu görülebilir. Tavan yükünün hidrolik direklerin ortasından etki ettiği 2. durumda tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen gerilmelerde 1. duruma göre düşüş olduğu gözlenmektedir. Tavan yükünün hidrolik direklerin önünde olduğu 3. durumda arka direklerde meydana gelen maksimum gerilmelerde düşüş devam etmiş, ancak ön direkler ve ana göçük sarmasında meydana gelen maksimum gerilmeler 2. duruma göre artış göstermiştir. Tavan yükünün hidrolik direklerin ön bölgesine uygulanması durumunda tavan sarmasının öne doğru eğileceği ve bu hareket nedeniyle tavan sarması ile göçük sarması arasındaki açısal konum değişecektir. Bu değişime bağlı olarak ana göçük sarmasında meydana gelen gerilme artışının sürtünmeden kaynaklandığı görülmektedir. Arka direklerde meydana gelen gerilme düşüşünün, tahkimat ünitesinin yük almaya başlamasıyla beraber ön direklerin baskılanması nedeniyle tavan sarmasının öne doğru eğilmesi ve arka direklerin yukarı doğru hareket etmesiyle direklerin rahatlaması sonucunda, ön direklerde meydana gelen gerilme artışının ise tavan yükünün bu bölgenin hemen önünde uygulaması sonucunda olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı temas durumlarında tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen maksimum gerilmeler

Farklı temas durumlarında yürüyen tahkimat ünitesinin tabanında meydana gelen reaksiyon kuvvetleri hesaplanmış ve tahkimat ünitesinin taban alanına bölünerek tabanda meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Şekil 9'da verilen grafiğe bakıldığında tahkimat ünitesinin tabanında meydana gelen en yüksek gerilmenin tahkimatın tavan sarmasıyla tavan tabakasının tam temas halinde olduğu 1. durumda olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Farklı temas durumlarında tabanda meydana gelen gerilmeler

Diğer durumlarda tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen gerilmeler daha düşük olmasına rağmen stabilite açısından bakıldığında 1. durumun tahkimatın ayak içindeki görevini en iyi şekilde yapması bakımından en iyi durum olduğu görülmektedir. Tavan yükünün, tavan sarmasına farklı bölgelerden etki etmesi durumlarında (2,3 ve 4. durumlarda) tavan sarmasının öne doğru eğilmesi, taban şasisinin ön veya arka kısımlarının tabana batması, göçük sarmasının göçük bölgesine doğru baskı yapması sonucunda tahkimat elemanlarında düzensiz yüklemelerin meydana gelmesi ve dolayısıyla ayak içindeki düzenin bozulması gibi durumlar meydana gelmektedir. Yürüyen tahkimat ünitesinin taşıyıcı görevini en iyi şekilde yerine getirmesi için tavan tabakası ile tamamen temas halinde olması gerekmektedir. Tavan sarması ve taban tabakasının tamamen teması halinde yük aktarımı en verimli şekilde olacağı için tahkimat elemanlarındaki gerilmeler bu durumda (1.durum) diğer durumlara göre daha yüksek olacaktır. Diğer durumlarda gerilmeler düşük olsa bile tahkimatlarda yukarıda bahsedilen olumsuz durumlardan dolayı verimsiz çalışma meydana gelecektir. Dolayısıyla tahkimatların çalışma verimleri değerlendirilirken tahkimat ünitesi

elemanlarında meydana gelen maksimum gerilme dağılımı mutlaka dikkate alınmalıdır ancak orantılı bir yük dağılımı tahkimat ünitesinin çalışma verimi açısından daha önemlidir. Tahkimat ünitesi elemanlarında meydana gelen maksimum gerilmeler modelleme çalışmaları sonucunda kullanılacak olan farklı çelik malzemelerle kontrol altına alınabilir ancak tahkimatların düzensiz yüklenmesi sonucunda meydana gelecek olan ve yukarıda belirtilen sorunlar neticesinde ayak çalışma verimi olumsuz etkilenecek ve bu durum zaman ve para kaybına neden olacaktır.

## SONUÇ

Çalışılan formasyonun jeolojik şartlarına bağlı olarak tavan tabakaları ile tahkimatın tavan sarması arasındaki temas durumları değişiklik göstermektedir. Çalışmada tahkimat ünitesinin tavan sarmasıyla tavan tabakasının olası temas durumları incelenmiştir. Bu temas durumlarında tahkimat ünitesinin hidrolik direklerinde ve göçük sarmasında meydana gelen gerilmeler hesaplanmıştır. Sonuç olarak tahkimat ünitesi elemanlarında ve tabanında meydana gelen gerilmelere bakıldığında en yüksek gerilmeler 1. durumda olmasına rağmen, tahkimat ünitesinin görevini etkili şekilde yapması ve stabilite açısından en iyi durumun 1. durum olduğu görülmektedir. Uzuna-yak madencilğinde çalışan mühendisler ve işçilerin ayak içindeki düzenin sağlanması ve iş güvenliği bakımından herhangi bir sorunla karşılaşılması için belirli aralıklarla yapılacak olan eğitim ve bilgilendirme faaliyetleri sayesinde tahkimatın ünitesi tavan sarmasının tavan tabakasıyla tamamen temas durumunda olmasını kontrol etmeleri ve sağlamaları büyük önem arz etmektedir.

## KAYNAKLAR

Akande, J.M., Saliu M.A., 2011. Design of a Powered Support System in Enugu Coal Mine, Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, (6), 1083-1089

ANSYS Workbench 2.0 Software 2013. USA.

Barczak T. M., 1991. 'A Model of Shield-Strata Interaction and its Implications for Active Shield Setting Requirements', Proc. 10th Int. Conf. on Ground Control in Mining, Morgantown, WV, USA, 35-42.

Barczak T. M., Gearhart D. F., 1992. Canopy and Base Load Distribution on a Longwall Shield, US Bureau of Mines, RI 9418, 1-23.

Destanoğlu N., Taşkın F. B., Taştepe M., Öğretmen S. 2000. Ömerler Mekanizasyon Uygulaması, TKİ, Ankara.

Goshtasbi, K., Oraee, K., Hhakupour-yeganeh, F., 2006. Shield Support Selection Based on Geometric Characteristics of Coal Seam, J. Min. Sci., 42, (2), 151-156.

Peng, S., Chiang, H., 1984. Longwall Mining, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, 235-237 pp.

SpaceClaim Engineer Software, 2014. SpaceClaim Corporation, USA.

Singh, G. S. P., Singh, U. K., 2008. Numerical Modelling Study of Strata and Support Behaviour in Thick Seam Longwall Workings, Min. Technol: Trans. Inst. Min. Metall., Section A, 117, (4), 191-201.

Singh, G. S. P., Singh, U. K., 2010. Prediction of Caving Behaviour of Strata and Optimum Rating of Hydraulic Powered Support for Longwall Workings, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47, 1-16.

Trueman, R., Lyman, G., Cocker, A., 2009. Longwall Roof Control Through a Fundamental Understanding of Shield-Strata Interaction, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 46, 371-380.

Özfiyat, M.K., 2007. "Ömerler Yer altı Kömür Ocağında Tam Mekanize Üretimde Oluşan Kayıpların Belirlenmesi ve Azaltılması Üzerine Araştırmalar", Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Verma, A. K., Deb. D., 2013. Numerical Analysis of an Interaction Between Hydraulic Powered Support and Surrounding Rock Strata, American Society of Civil Engineers.

Yetkin, M. E., 2016. Yürüyen Tahkimatların Boyutlandırılmasının ve Tahkimat Seçim Kriterlerinin Belirlenmesi Üzerine Araştırmalar. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.





Orijinal Araştırma / Original Research

## OPERATIONAL PERFORMANCE OF A CONVENTIONAL TWO-COMPARTMENT BALL MILL GRINDING CIRCUIT AT DIFFERENT CEMENT PRODUCTIONS

### KONVANSİYONEL İKİ KAMARALI BİLYALI DEĞİRMEN ÖĞÜTME DEVRESİNİN FARKLI ÇİMENTO ÜRETİMLERİNDE İŞLETME PERFORMANSI

Ömürden Genç<sup>a,\*</sup>, A.Hakan Benzer<sup>b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> Muğla Sıtkı Koçman University, Mining Engineering Department, Muğla, TURKEY

<sup>b</sup> Hacettepe University, Mining Engineering Department, Ankara, TURKEY

Geliş Tarihi / Received : 27 Kasım / November 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 19 Şubat / February 2018

#### ABSTRACT

**Keywords:**  
Grinding,  
Ball mill,  
Air classifier,  
Cement,  
Energy.

The purpose of the study is to assess the grinding and classification performance of a conventional Polysius® two-compartment ball mill and a Sepol® dynamic air classifier closed circuit process at Portland CEMII/42.5R and Portland composite CEMII/32.5R cement production types. For this purpose, industrial scale sampling surveys were performed around the circuit. JKSimMet Steady State Mineral Processing Software was used to perform mass balance around the circuits. Size reduction performance of the ball mill was determined for the sampling cases. Classification performance of the dynamic air classifier was evaluated based on the efficiency curve approach. It was determined that, approximately 12% circuit capacity increase could be achieved in composite cement production when ball mill, ball mill filter and air classifier power consumptions were considered. This figure corresponded to overall energy savings of 7% in ball mill grinding.

#### ÖZ

**Anahtar Sözcükler:**  
Öğütme,  
Bilyalı değirmen,  
Havalı sınıflandırıcı,  
Çimento,  
Enerji.

Bu çalışmanın amacı, konvansiyonel Polysius® iki kamaralı bilyalı değirmen ve Sepol® dinamik havalı sınıflandırıcı kapalı devre işleminin Portland CEMII/42.5R ve Portland kompoze CEMII/32.5R çimento üretimlerinde öğütme ve sınıflandırma performanslarının değerlendirilmesidir. Bu amaçla, devre etrafında endüstriyel örnekleme çalışmaları yürütülmüştür. JKSimMet Cevher Hazırlama Yazılımı ile devre etrafında madde denkliği yapılmıştır. Bilyalı değirmenin boyut küçültme performansı örnekleme dönemleri için belirlenmiştir. Dinamik havalı sınıflandırıcının sınıflandırma performansı verimlilik eğrisi yaklaşımına göre değerlendirilmiştir. Bilyalı değirmen, bilyalı değirmen filtresi ve havalı sınıflandırıcı enerji tüketimleri düşünüldüğünde, kompoze çimento üretiminde devre kapasitesinde yaklaşık olarak %12'lik bir artış sağlanabilmektedir. Bu değer, bilyalı değirmen öğütmesinde %7'lik bir enerji tasarrufuna karşılık gelmektedir.

\* Sorumlu yazar: [ogenc@mu.edu.tr](mailto:ogenc@mu.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0003-3177-1425>

\*\* [benzer@hacettepe.edu.tr](mailto:benzer@hacettepe.edu.tr) • <https://orcid.org/0000-0002-5614-5175>

## INTRODUCTION

World's cement production was recorded to be 4200000 million ton/year and Turkey has a share of 77000 ton/year. Turkey is ranking in the 4<sup>th</sup> row within the countries producing cement in the world (United States Geological Survey, 2016). The cement industry is energy intensive which consumes approximately 12-15% of total industrial energy use (Madloul et.al., 2011). Finish grinding of cement requires approximately 40% of the total electrical energy consumed in a cement plant (Norholm, 1995). In this respect, energy efficiency of finish grinding stage will save significant amount of energy. Thus, ways to improve cement grinding efficiency should be searched out. Useful insights could be obtained from industrial scale applications and production efficiencies for energy saving or more energy efficient production rates (Benzer, et.al., 2001; Genç et.al., 2006; 2008; Aydoğan and Benzer, 2011; Dundar et.al., 2011; Genç and Benzer, 2012; 2016).

In this study, production performance and energy consumptions of industrial cement grinding circuit were analysed when CEMI/42.5R type Portland and CEMII/32.5R type Portland composite cements were produced in the circuits. It was demonstrated that, CEM II type Portland composite cement production provided overall energy savings of 7% with the applied circuit flow configuration.

## 1. MATERIALS AND METHODS

### 1.1. Materials

CEMI/42.5R Portland cement was obtained by grinding Portland cement clinker and mineral additive material gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Portland cement clinker is a black nodular hydraulic material, made by burning in a rotary kiln (pyroprocessing), at least to sintering a precisely specified mixture of raw materials containing  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  at temperatures of about  $1400^\circ\text{C}$  (Hewlett, 2010). Portland composite cement (CEMII/32.5R) was obtained by grinding clinker, gypsum and natural pozzolanic material which is called trass. Pozzolana is a siliceous and aluminous material that contains volcanic material such as pumice or volcanic ash. Trass

affects several properties of cement mortar and cement clinker significantly such as strength, setting time, the amount of  $\text{C}_3\text{S}$  ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) (alite mineral) and durability, depending on the their substitution ratio and fineness. In the investigated circuit, fly ash was added to air classifier feed stream directly due to its fineness in Portland composite cement (CEMII/32.5R) production case. Fly ash is a pozzolanic material and it is a by-product of burning pulverized coal in an electrical generating power station. It is collected from the exhaust gases by mechanical and electrostatic precipitators. It improves the long-term strength and reduces the permeability of the concrete (Thomas, 2007).

### 1.2. Plant-site Studies

Figure 1 shows the circuit flowsheet with the sampling points for the (CEMI/42.5R) Portland cement production case. Polysius® two-compartment ball mill and a Polysius® Sepol® dynamic high efficiency air classifier were operated in closed circuit to obtain the required cement types.

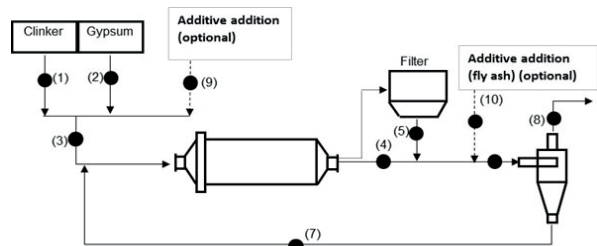


Figure 1. Simplified flowsheet of the industrial scale cement production circuit

Sampling points correspond to the following streams in Figure 1:

- (1) Clinker feed
- (2) Gypsum feed
- (3) Total fresh feed
- (4) Mill overflow
- (5) Filter return
- (6) Air classifier (separator) feed
- (7) Air classifier reject
- (8) Air classifier fine
- (9) Trass (in composite cement production)
- (10) Fly ash (in composite cement production)

Sampling surveys at the cement plant were performed to characterize particle size distributions around the circuits and inside the mills at the steady state conditions at Portland cement (CEMI/42.5R) and Portland composite cement (CEMII/32.5R) production types.

Design specifications for the ball mill and air classifier are tabulated in Tables 1 and 2. An electrofilter at the discharge of the mill collects fine particles (100% -212µm in CEMI production and 100% -850µm in CEMII production) from the mill by air sweeping. The circuit was operated without grinding aid in survey-1. However, grinding aid was added to the mill when trass and ash were added to the process in survey-2. Fly ash was added to the air classifier feed stream in survey-2. Samples were collected from the streams shown in Figure 1 at the steady state condition of the circuits at both cement production types.

Table 1. Polysius® two-compartment ball mill specifications

| Parameter   | Value |
|---|-------|
| Diameter (m)  | 4.8   |
| Compartment-1 length (m)  | 4.25  |
| Compartment-2 length (m)  | 10    |
| Mill motor (kW)   | 5200  |
| Mill revolution (rpm)   | 14.87 |
| Critical speed (%)  | 77.02 |
| Volumetric air flowrate (m <sup>3</sup> /h) at 100% fan opening | 65000 |
| Ball load (%) (compartment-1)                                   | 32.3  |
| Ball load (%) (compartment-2)                                   | 31.2  |

Table 2. Air classifier design and operational specifications

|                                       |                 |
|---------------------------------------|-----------------|
| Air classifier brand                  | Sepol® NSV310/4 |
| Diameter (mm)                         | 3100            |
| Revolution of motor (rpm)             | 251.13          |
| Revolution of rotor (rpm)             | 31              |
| Number of cyclones                    | 4               |
| Pressure increase (mbar)              | 38.1            |
| *Air flowrate, Q (Bm <sup>3</sup> /h) | 254107          |

\*Bm<sup>3</sup> /h: Cubic meter at operating pressure

### 1.3. Mill Inside Sampling Survey

Ball mill was crashed-stopped for inside mill sampling in survey-1 after completing of the circuit sampling. Both compartments of the ball mill were sampled by approximately 1meter along the long axis of the mill from an approximate depth of 40cm below the mill ball charge level. Mill inside sampling locations are tabulated in Table 3.

Table 3. Measured mill inside sampling locations in grinding compartments 1 and 2 in survey-1 (CEMI/42.5R Portland cement production)

| Compartment-1 axial length (m) | Compartment-2 axial length (m) |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 (compartment inlet)          | 0 (compartment inlet)          |
| 1.2                            | 1                              |
| 2.4                            | 2                              |
| 3.6                            | 3                              |
| 4.8                            | 4                              |
|                                | 5                              |
|                                | 6                              |
|                                | 7                              |
|                                | 8                              |
|                                | 9                              |
|                                | 10                             |

### 1.4. Material Characterization

#### 1.4.1. Particle Size Distribution

Particle size distributions of the samples were determined by dry sieving from the top size which was 50mm down to 150µm. Sub-sieve sample of -150µm material was dry sized down to 1.8µm by using a Sympatec® laser diffractometer. Ro-tap screening and laser sizing results were mathematically combined to obtain the full size distribution from the top size down to 1.8µm.

## 2. RESULTS AND DISCUSSION

### 2.1. Mill Inside Granulometry

Measured mill inside particle size distributions are plotted in Figures 2 and 3 which shows the size reduction progress inside the mill. As the particle size distributions become finer towards the end

of the compartment length, grinding performance increases. When the particle size distributions become coarser, grinding performance decreases within that segment of the mill due to operational conditions.

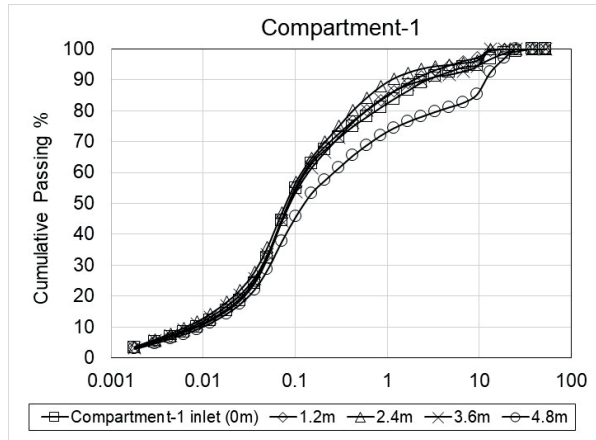


Figure 2. Mill inside particle size distributions in compartment-1

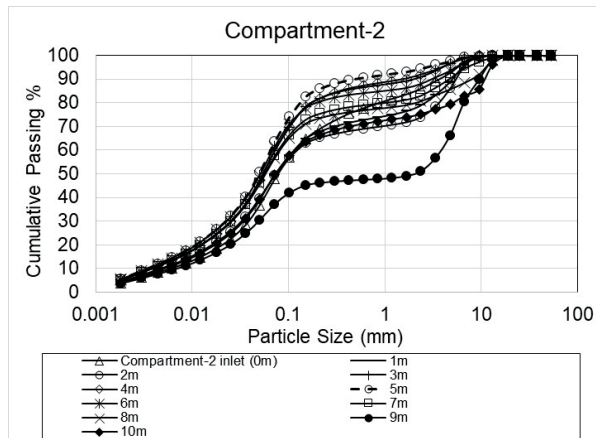


Figure 3. Mill inside particle size distributions in compartment-2

## 2.2. Mass Balance Calculations Using JKSimMet Software

Mass balance of the circuits were performed to estimate statistically adjusted tonnage flowrates and particle size distributions by using the mass balance module of the JKSimMet Mineral Processing Simulator. Calculated (mass balanced) tonnage flowrates and fineness values are given in Figures 4 and 5. Agreement between the experimental and calculated particle

size distributions are shown in Figures 6 to 8. A comparison for ball mill feed and discharge particle size distributions is given in Figure 9. A very good agreement was obtained which indicated a successful sampling operation in each survey. Hence, mass balanced values could be used in performance evaluation study.

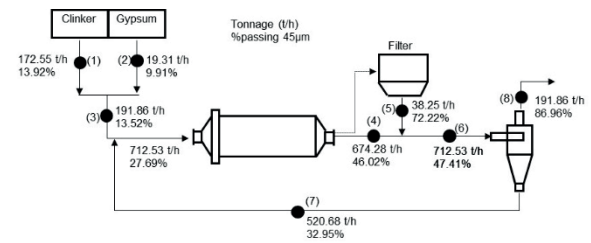


Figure 4. Mass balanced flowsheet of the sampled circuit in CEMI/42.5R Portland cement production (survey-1)

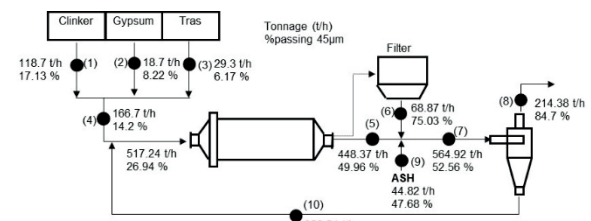


Figure 5. Mass balanced flowsheet of the sampled circuit in CEMII/32.5R Portland composite cement production (survey-2)

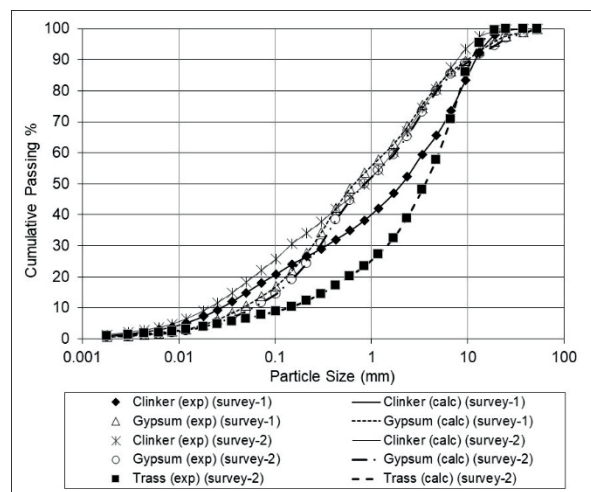


Figure 6. Experimental and calculated particle size distributions of circuit fresh feed materials in survey-1 and survey-2

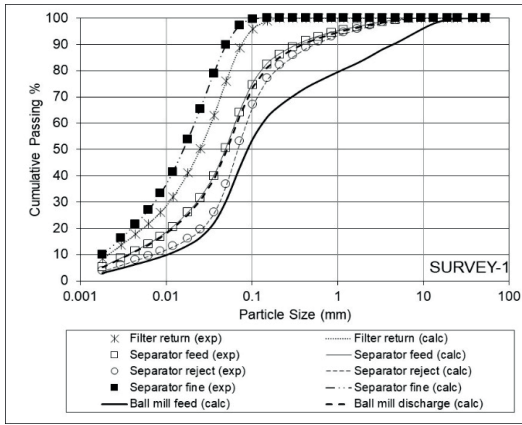


Figure 7. Experimental and mass balanced particle size distributions around the circuit in CEMI/42.5R Portland cement production (survey-1)

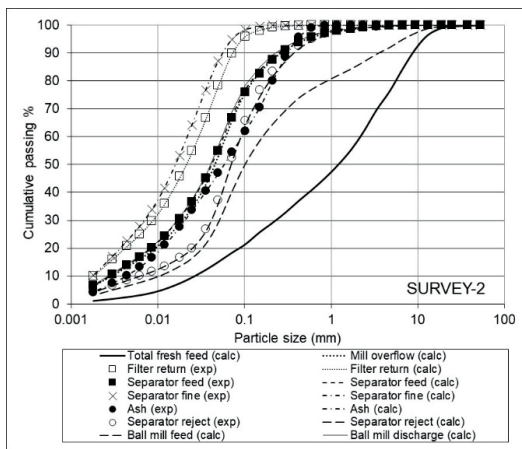


Figure 8. Experimental and mass balanced particle size distributions around the circuit in in CEMII/32.5R Portland composite cement production (survey-2)

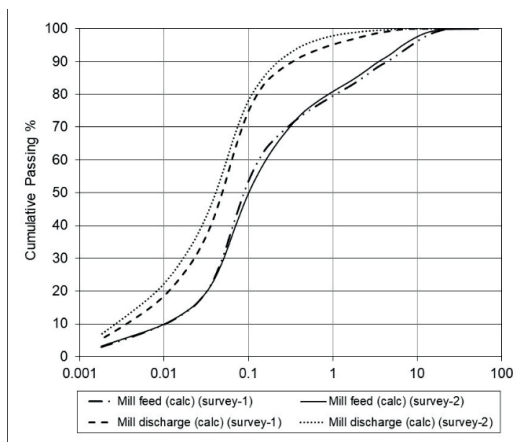


Figure 9. Ball mill feed and discharge particle size distributions in survey-1 and survey-2

### 2.3. Size Reduction Performance

Cumulative 90%, 80% and 50% passing sizes which are  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  sizes of the mill inside samples respectively are determined to evaluate the size reduction progress along the long axis of the compartments. Mill inside sampling was not performed in survey-2 due to the operational conditions. Results are tabulated in Table 4 for survey-1. Mill inside fineness variation was characterized by the variation of  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes along the long axis of the mill. Variations are shown in Figures 10 and 11.

Table 4.  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  sizes for mill inside samples in compartment-1 and 2 in survey-1

| Sampling location        | $x_{90}$ (mm) | $x_{80}$ (mm) | $x_{50}$ (mm) |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 0m (compartment-1 inlet) | 2.75          | 0.74          | 0.086         |
| 1.2m                     | 1.90          | 0.57          | 0.085         |
| 2.4m                     | 1.10          | 0.42          | 0.080         |
| 3.6m                     | 2.40          | 0.57          | 0.086         |
| 4.8m                     | 11.80         | 3.50          | 0.125         |
| 0m (compartment-2 inlet) | 3.70          | 0.85          | 0.077         |
| 1m                       | 5.00          | 2.60          | 0.074         |
| 2m                       | 5.50          | 3.60          | 0.073         |
| 3m                       | 2.00          | 0.17          | 0.054         |
| 4m                       | 1.50          | 0.17          | 0.055         |
| 5m                       | 0.45          | 0.13          | 0.049         |
| 6m                       | 3.00          | 0.19          | 0.050         |
| 7m                       | 4.50          | 0.90          | 0.056         |
| 8m                       | 8.00          | 2.10          | 0.057         |
| 9m                       | 9.50          | 6.50          | 2.000         |
| 10m                      | 10.70         | 5.00          | 0.073         |

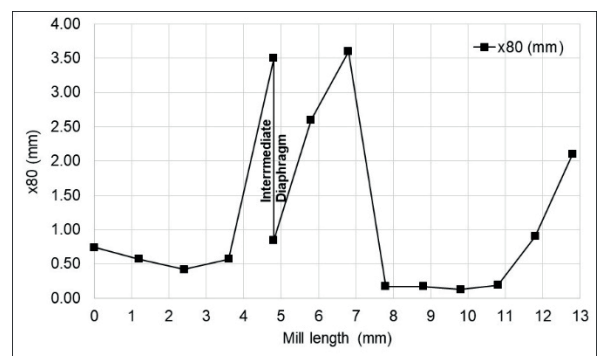


Figure 10.  $x_{80}$  size variation along the mill length (survey-1/CEM I production)



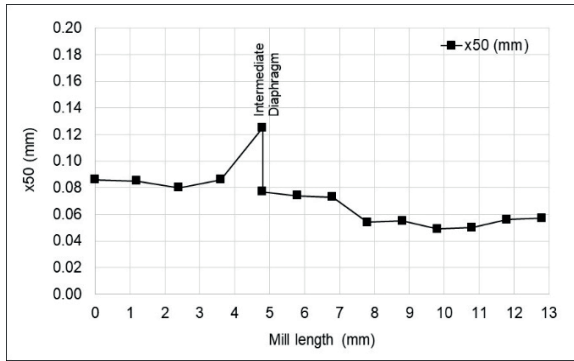


Figure 11.  $x_{50}$  size variation along the mill length (survey-1/CEM I production)

A consistent size reduction was observed in the first 2.4meters of the compartment length when  $x_{80}$  size of the mill inside particle size distributions were considered (Figure 10). Accumulation of coarse particles were increased at the rest of the compartment-1 length due to the screening effect. At coarse size ranges which is indicated by the  $x_{80}$  particle size, coarse particle accumulation was observed in the first 2meters and in the last 2meters of the compartment-2 length. Inefficient grinding conditions in the first 2 meters of the compartment-2 length could be attributed to the ball size classification inside the mill. Balls in the second compartment should be classified from coarser to finer due to the classifying liner effect. That's why, ball size classification and liner conditions (i.e. abrasion, damage etc.) should be checked systematically during production and necessary maintenance should be performed. A rapid size reduction was observed at the 7.8meters of the mill length. However after this point, a considerable size reduction could not have been observed. It could be concluded that, size reduction performance in the second compartment was very low at coarse size ranges.

A consistent size reduction was determined in the first 2.5meters of the first compartment on the basis of the  $x_{50}$  particle size (Figure 11). However,  $x_{50}$  size started to increase after the 2.4meters of the compartment length due the screening effect of the intermediate diaphragm. As the material was screened on the intermediate diaphragm, coarser particles were rejected back into the compartment-1. That's why particle size

distributions became coarser at the end of the first compartment. Consistent size reduction was observed in the second compartment up to the 11<sup>th</sup> meters of the mill length. However, size reduction performance was decreased at the rest of the mill length. As similar to the case in compartment-1 due to the screening effect of the discharge diaphragm, particle size distributions became very coarse towards the end of the second compartment which corresponded to the length of last 1meter of the second compartment. Size reduction performance was determined to be very low at fine size ranges which was assumed to be represented by the median size ( $x_{50}$ ) of the mill inside size distributions.

Size reduction ( $F_n/P_n$ ) determined according to  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes for compartments 1 and 2 in survey-1 (n=90, 80, 50) are given in Table 5.  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes of mass balanced mill feed and discharge size distributions are given in Table 6 for the determination of the overall size reduction performance of the ball mills. Size reduction ratios are tabulated in Table 7. Size reduction performance in compartment-2 was determined to be higher than that of the compartment-1. Mass balance calculations showed that, mill throughput rate was 712.53t/h in survey-1 (when grinding aid was not added).

Table 5. Size reduction ( $F_n/P_n$ ) determined according to  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes for compartments 1 and 2 in survey-1 (n=90, 80, 50) (C-1: Compartment-1, C-2: Compartment-2, MD: Mill Discharge)

|           | Mill feed      | C-2 inlet (0m) | Mill feed      | C-2 inlet (0m) | Mill feed      | C-2 inlet (0m) |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|           | $F_{90}$ (mm)  | $P_{90}$ (mm)  | $F_{80}$ (mm)  | $P_{80}$ (mm)  | $F_{50}$ (mm)  | $P_{50}$ (mm)  |
| C-1       | 4.2            | 3.7            | 1.05           | 0.85           | 0.086          | 0.077          |
| $F_n/P_n$ | 1.1            |                | 1.2            |                | 1.1            |                |
|           | C-2 inlet (0m) | MD             | C-2 inlet (0m) | MD             | C-2 inlet (0m) | MD             |
| C-2       | 3.7            | 0.34           | 0.85           | 0.126          | 0.077          | 0.048          |
| $F_n/P_n$ | 10.9           |                | 6.7            |                | 1.6            |                |

Table 6.  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes of mass balanced mill feed and discharge size distributions

| Characteristic size     | Survey-1 | Survey-2 |
|-------------------------|----------|----------|
| Feed $F_{90}$ (mm)      | 4.200    | 3.500    |
| Discharge $P_{90}$ (mm) | 0.340    | 0.230    |
| Feed $F_{80}$ (mm)      | 1.050    | 0.800    |
| Discharge $P_{80}$ (mm) | 0.126    | 0.110    |
| Feed $F_{50}$ (mm)      | 0.086    | 0.097    |
| Discharge $P_{50}$ (mm) | 0.048    | 0.040    |

Table 7. Overall size reduction ( $F_n/P_n$ ) determined according to  $x_{90}$ ,  $x_{80}$  and  $x_{50}$  particle sizes (n=90, 80, 50)

| Sampling Surveys | $F_{90}/P_{90}$ | $F_{80}/P_{80}$ | $F_{50}/P_{50}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Survey-1         | 12.4            | 8.3             | 1.8             |
| Survey-2         | 15.2            | 7.3             | 2.4             |

However, it was calculated as 564.92t/h when grinding aid was added. Circulating load ratio of the mill was decreased from 271% to 164% in survey-2. Size reduction ratio (SRR) based on  $x_{90}$  and  $x_{50}$  sizes were increased. SRR of  $x_{80}$  size was decreased slightly which is not significant. Consequently, we could say that, SRR was increased in grinding aid addition case. Overall size reduction performance of the mill was improved at CEMII type Portland cement production. This achievement lead to the increase in circuit throughput rate. By this way, circuit capacity was increased. The same circuit could be operated at a 12% higher capacity value by using grinding aid at CEMII type Portland cement production. Grinding aid should be applied to ease the grinding of trass in the mill which increases the production capacity. Energy consumptions of the ball mill are compared for the sampling surveys in Table 8. According to these figures 7% energy saving was attained in survey-2.

Table 8. Energy consumptions of the ball mill during sampling surveys

| Operational parameters                 | Survey-1 | Survey-2 |
|--|----------|----------|
| Circuit capacity (t/h)                 | 191.86   | 214.38   |
| Operational ball mill motor power (kW) | 4580.00  | 4785.51  |
| Energy consumption (kWh/t)             | 23.87    | 22.32    |

#### 1.4. Classification Performance of the Sepol® Dynamic Air Classifier

The Sepol® high efficiency separator (air classifier) has a high availability, high selectivity, low specific energy consumption, short amortization period and relatively capital cost. Sepol®SV (Standard Version) is equipped with cyclones which collect fine material. There is filter which dedusts the separator. The central material feed provides uniform material distribution and achieves effective utilization of the separation area. The separating air stream is produced by an external fan and fed to the separating chamber through a spiral-shaped duct. The material is separated into fine and coarse fractions in the separating chamber due to the action of gravitational and airflow forces. Guide vanes at the outlet of the spiral maintain the swirl of the air stream. Rotor blades prevent coarse material from entering the interior of the rotor. The coarse material falls into the grit cone and is returned to the grinding process. The fines are carried by the separating air into the interior of the rotor and are sucked downwards and then carried to the fines collectors (cyclones). Utilization of the gravitational force significantly reduces the energy requirement of the machine. The dedusted separating air stream is returned to the fan. The fineness and granulometric composition of the finished material (product) can be varied over a large range, primarily by altering the rotor speed and secondarily by controlling the separating air flowrate (Polysius Co., 2018) Efficiency or partition (Tromp) curves were plotted to determine the classification performance of the Sepol® dynamic air classifier in the sampling surveys. The tromp curve indicates the probability of a particle in the air classifier feed that will be returned to the mill (Genç and Benzer, 2017). Partition coefficients were calculated from Equation 2.1 to plot the efficiency curves.

$$\text{Partition coefficient} = \frac{Uu}{Ff} \times 100 \quad (2.1)$$

U :Air classifier reject flowrate (t/h)

F :Air classifier feed flowrate (t/h)

u :Percentage of particle size i in an air classifier reject stream (%)

f :Percentage of particle size i in an air classifier feed stream (%)

Sepol® air classifier feed size distributions are compared in Figure 12 for the sampling surveys. It was determined that, feed size distribution of the air classifier became slightly finer in survey-2. Efficiency curves for the air classifier are given in Figure 13. Performance parameters of the efficiency curves are tabulated in Table 9. Cut size or separation size ( $d_{50}$ ) defines the size for which 50% of the particles in the feed report to the underflow stream (Svarovsky, 1984). By-pass represents the percentage of feed material reporting to air classifier reject without classification. Fish-hook parameter represents the difference between the maximum percentage of fine material amount that appears in underflow of the air classifier and the by-pass percentage. As the fish-hook and by-pass amount decrease, separation performance increases. Perfect separation can be achieved with zero fish-hook and by-pass amount.

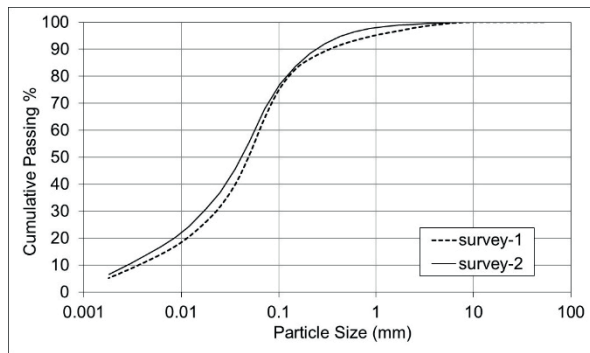


Figure 12. Sepol® air classifier feed size distributions in sampling surveys

Air classifier performance was determined to be higher in CEMII Portland cement production case with lower by-pass and fish-hook per cent values. Grinding aid addition lowered the air classifier feed rate and more finer material was fed to the air classifier. This condition improved the classification performance. Since by-pass amount decreased in the new operational case, less amount of fine material was rejected to the ball mill which could be one of factors affecting the size reduction performance of the ball mill. Consequently, circulating load was recorded to decrease in survey-2. Recirculation of less fine material to the ball mill will prevent coating and cushioning effects in the mill. It could be concluded

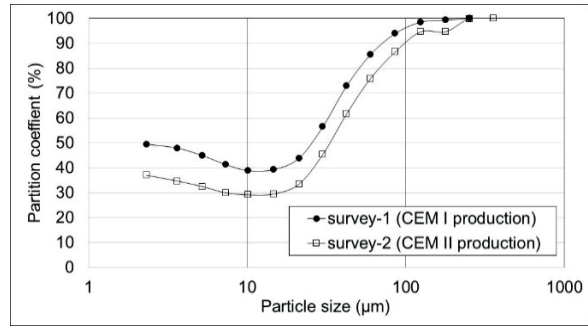


Figure 13. Efficiency curves of the air classifier in survey-1 and survey-2

Table 9. Air classifier performance parameters

| Parameters    | Survey-1 | Survey-2 |
|---------------|----------|----------|
| $d_{50}$ (µm) | 25.30    | 33.20    |
| By-pass (%)   | 38.85    | 29.18    |
| Fish-hook (%) | 10.65    | 7.84     |

## CONCLUSIONS

Grinding performance of the two-compartment ball mill was improved in CEMII type Portland cement production in which grinding aid was applied as the mill feed size distribution became coarser. Air classifier separation performance was also improved in CEMII type Portland cement production case. Addition of fly ash to the air classifier feed stream also affected the circuit capacity. Consequently, approximately 12% circuit capacity increase was achieved in CEM II Portland cement production case which lead to decrease the overall energy consumption by 7% in ball mill grinding.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Authors would like to acknowledge the Turkish Scientific and Technical Research Council (Projects: MISAG 190 and MAG 104M369), Hacettepe University Research Unit (Project: 0202602020) and the researchers involved for their valuable help.

## REFERENCES

Aydoğan N.A., Benzer, A.H., 2011. Comparison of the Overall Circuit Performance in the Cement Industry: High Compression Milling vs. Ball Milling Technology. Minerals Engineering, 24, pp211-215

- Benzer, A.H., Ergun, Ş.L., Öner, M., Lynch, A.J., 2001. Simulation of Open Circuit Clinker Grinding. *Minerals Engineering*, 14 (7), pp701-710.
- Dundar, H., Benzer, H., Aydoğan, N.A., Altun O., Toprak N.A., Özcan, O., Eksi, D., Sargin A., 2011. Simulation Assisted Capacity Improvement of Cement Grinding Circuit: Case Study Cement Plant. *Minerals Engineering*, 24, pp205-210.
- Genç, Ö., Benzer, A.H., 2012. Size Reduction Performance Evaluation of Open Circuit Three-Compartment Industrial Scale Cement Grinding Tube Mill. XIIIth International Mineral Processing Symposium, Bodrum, Turkey, pp67-73.
- Genç, Ö., Benzer, A.H., 2016. Performance Evaluation of an Industrial Scale Two-compartment Cement Ball Mill and Dynamic Air Classifier Closed Circuit Process at Different Feed Conditions. 15th International Mineral Processing Symposium. Ekim, 19-21, İstanbul, pp187-201.
- Genç, Ö., Benzer, A.H., Ergün, Ş.L., 2006. Grinding Performance Evaluation of Two-Compartment Cement Grinding Ball Mills. 11th European Symposium on Comminution. Budapest, Hungary.
- Genç, Ö., Benzer, A.H., Ergün, Ş.L., 2008. Effect of High Pressure Grinding Rolls (HPGR®) on Grinding Performance of Two-Compartment Cement Ball Mill. 11th International Mineral Processing Symposium, Antalya, Turkey, pp69-74.
- Genç, Ö., Benzer, A.H., 2017. Performance Evaluation of a Conventional Closed Circuit Process at Different Cement Productions. *New Trends in Mining, Proceedings of 25th International Mining Congress of Turkey, Antalya, Turkey*, pp423.
- Hewlett, P.C., 2010. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Fourth ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, ISBN: 978-0-7506-6256-7.
- Madlool, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., 2011. A Critical Review on Energy Use and Savings in the Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp2042-2060.
- Munn, N., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic T., 2005. *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimization*, JKMRRC, Brisbane.
- Norholm, A., 1995. *Notes on Energy Conservation*, FL Smidth and Co. a/s, Seminar, İstanbul, Turkey.
- Polysius Co., 2018, Sepol® High Efficiency Separator. <https://www.scribd.com/document/105678169/1592-SEPOL-gb> (accessed 29 May 2018) (Note: digital brochure)
- Svarovsky, L., 1984. *Hydrocyclones*. Holt, Rinehart & Winson Ltd., Eastbourne.
- Thomas, M., 2007. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*, Portland Cement Association Publication, USA.
- United States Geological Survey, 2016. *Mineral Commodity Summaries*. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gold/mcs-2016-gold.pdf> (accessed 2 Sept 2016) (Note: digital report)



ISSN 2564-7024



9 772564 702003