

BİLİMSEL MADENCİLİK DERGİSİ
Scientific Mining Journal

Cilt / Vol: 57, Sayı / No: 3, Eylül / September, 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 Can, Hacettepe Üniversitesi / *Hacettepe University*

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

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

Editör Yardımcıları / Editor Assistants

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

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

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>

BİLİMSEL
madencilik
SCIENTIFIC MINING JOURNAL
DERGİSİ

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

EYLÜL
SEPTEMBER
2018

CİLT
VOLUME
57

SAYI
NUMBER
3

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

- Serdar Yaşar 139 Orijinal Araştırma / Original Research
Küçük Boyutlu Kaya Kesme Deneyinin Taşınabilir Bir Kesme Setinde Uygulanması
Application of Small-Scale Rock Cutting Test in a Mobile Rock Cutting Equipment
- Özgür Özcan 149 Orijinal Araştırma / Original Research
Murgul Bakır Cevherinin Ön Zenginleştirmesinde Alternatif Yaklaşımlar
Alternative Approaches to Pre-Concentration of Murgul Copper Ore
- Ergin Gülcan 163 Orijinal Araştırma / Original Research
Özcan Yıldırım Gülsoy
Sivas Bölgesine ait Demir Cevherini Kuru Manyetik Ayırma ile Zenginleştirme Çalışmaları ve Uygun Tesis Tasarımı
Enrichment Studies of Iron Ore in Sivas Region With Dry Magnetic Separation and Proper Plant Design
- Sevgi Çetintaş 177 Orijinal Araştırma / Original Research
İbrahim Nazlı
Doğal Taş Parlatma Sürecinde Kalınlık ve Parlaklık Değişiminin Shewhart Kontrol Grafikleri ile İncelenmesi
Investigation of Thickness and Brightness Change With Shewhart Control Charts In Natural Stone Polishing Process
- Hakan Dündar 189 Orijinal Araştırma / Original Research
Dik Milli Darbeli Kırıcılarda Rotor Hızı Boyut Küçültme İlişkisi
Rotor Speed - Size Reduction Relationship in a Vertical Shaft Impact Crusher
- Mustafa Birinci 197 Derleme / Review
Ramazan Gök
Ön Desilikasyon Amaçlı Boksit Zenginleştirme İşlemleri Üzerine Güncel Bir Değerlendirme
A Current Review on Beneficiation Process of Bauxite Ores for Pre-Desilication



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 / info@mining.org.tr
web: <http://www.madencilik.org.tr> / <http://www.mining.org.tr>

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

Tasarım / *Design: Gülendem Gültekin*

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

Baskı Tarihi ve saati / *Printing date: 12.8.2018 at 09:00*

Basım adedi / *Number of printed copy: 1500*



Orijinal Araştırma / Original Research

KÜÇÜK BOYUTLU KAYA KESME DENEYİNİN TAŞINABİLİR BİR KESME SETİNDE UYGULANMASI

APPLICATION OF SMALL-SCALE ROCK CUTTING TEST IN A MOBILE ROCK CUTTING EQUIPMENT

Serdar Yaşar^{a,*}

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

Geliş Tarihi / Received : 27 Kasım / November 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 19 Şubat / February 2018

Anahtar Sözcükler:

Karot kesme deneyi,
 Özgül enerji,
 Kesme kuvveti,
 Performans tahmini,
 Kollu galeri açma makineleri.

Keywords:

Core cutting test,
 Specific energy,
 Cutting force,
 Performance prediction,
 Roadheaders.

ÖZ

Küçük boyutlu kaya kesme deneyi (karot kesme deneyi), en sık kullanılan kaya kesme deney düzeneklerinden birisidir. Bu deney düzeneğinden elde edilen deneysel sonuçlar marifetiyle, kollu galeri açma makinesi ve döner kepçeli ekskavatör performans tahmini ve ripplenebilirlik sınıflaması yapılabilmektedir. Ancak, bu deney setleri sabit ekipmanlardır, üretilmeleri zahmetlidir ve sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır. Bu çalışmada küçük boyutlu kaya kesme deneyinin, taşınabilir ve hidrolik eğilme test makinelerine bir eklenti olarak tasarlanan düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile gerçekleştirilebilmesi hususu irdelenmiştir. DKKS genel hatları ile tanıtılmış ve geçmiş çalışmalardan bilgiler sunulmuştur. DKKS'de küçük boyutlu kaya kesme deneyinin kolaylıkla ve başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Buna ilave olarak, bir adet kollu galeri açma makinesi çalışma sahası ziyaret edilmiş ve alınan numuneler üzerinde gerçekleştirilen kesme deneyleri ile makinenin kazı hızı kestirilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, bu makinenin kazı hızı gerçeğe yakın bir şekilde kestirilmiştir. Elde edilen veriler ve tecrübeler ışığında, DKKS ile kaya kesme deneylerinin rutin bir kaya mekaniği deneyi gibi gerçekleştirilebildiği gösterilmiştir.

ABSTRACT

Small-scale rock cutting test (core cutting test) is one of the most frequently used rock cutting testing arrangements. Thanks to the experimental outcomes obtained from these testing arrangements, roadheader and bucket-wheel excavator performance prediction and rippability classification might be performed. However, these rigs are stable arrangements, are hard to be reproduced and they can be found in a very limited number of research centers. In the present study, application of small-scale rock cutting test with vertical rock cutting rig (VRCR), which is designed as a mobile rig and as an attachment to hydraulic bending test machines, was exclusively demonstrated. VRCR was basically introduced and results from previous studies were shown. It has been shown that small-scale rock cutting test may be applied easily and successfully with VRCR. Furthermore, a roadheader work site was visited and samples were collected. Cutting rate of the roadheader was predicted with the results of cutting tests in VRCR. As a result, cutting rate of the roadheader was estimated successfully. In the light of the obtained experiences and experimental results, it was shown that a rock cutting test may be performed as a routine rock mechanics test in VRCR.

* Sorumlu yazar: seyasar@ktu.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0003-4973-7970>

GİRİŞ

Mekanize kazı uygun koşullar altında, delme ve patlatma yöntemine göre birçok avantaj sunmaktadır. Ayrıca, günümüz teknolojisi ile delme ve patlatma yöntemine karşı tek ekonomik alternatif kazı yöntemidir. Sunduğu avantajlara rağmen, makinelerin ilk yatırım maliyetleri çok yüksek olduğundan dolayı kazı yapılacak olan formasyona uygun olarak seçilmelidirler ve kazı hızlarının önceden kestirilmesi gerekmektedir. Bu amaç için geliştirilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Rostami ve Ozdemir, 1996). Ancak, kaya kesme deneyleri bu yöntemler arasında en kesin yöntem olarak kabul edilmektedir (Bilgin vd., 2014).

Kaya kesme deneyleri, tam boyutlu ve küçük boyutlu kesme deneyleri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Tam boyutlu kesme deneylerinde büyük kaya blokları ve gerçek keskinler kullanılırken, küçük boyutlu kaya kesme deneylerinde genellikle indeks keskinler ve küçük blok numuneler ya da karot numuneleri kullanılmaktadır. Tam boyutlu kesme deney setleri çok sınırlı sayıda araştırma merkezinde bulunmaktadır ve gerçekleştirilmesi pahalı deneylerdir. Ayrıca, bu deneylerde çok büyük kaya bloklarına ihtiyaç duyulmaktadır ki bazı durumlarda bu tip numunelerin temini mümkün olmamaktadır (Balcı ve Bilgin, 2007). Tam boyutlu kesme deneylerine alternatif olarak, çeşitli araştırmacılar farklı kaya kesme deney düzenekleri geliştirmişlerdir (Roxborough ve Philips, 1974; Detournay vd., 1997; Stavropoulou, 2006; Bilgin vd., 2010; Entacher vd., 2014; Yaşar, 2018). Bu deney düzenekleri içerisinde en çok kullanılan ve tekrar üretilen kesme deney düzenegi karot kesme deneyidir (Roxborough ve Philips, 1974). Bu deney seti genellikle, torna makinelerinin modifiye edilmesi sureti ile geliştirilmektedirler, sabit ve tekrar üretilmesi zor deney düzenekleridir.

Bu çalışmada daha önce geliştirilmiş (Yaşar, 2018) olan düşey kayaç kesme seti (DKKS) ile karot kesme deneyinin gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. DKKS, taşınabilir ve seri üretime uygun olarak tasarlanan ve hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidro-

lik eğilme test makinelerine bir eklenti olarak üretilen bir kaya kesme deney düzenegidir. Bu amaçla, daha önce başka bir deney düzenegi ile çeşitli kaya/cevher numuneleri üzerinde gerçekleştirilen karot kesme deneyinin sonuçları ile DKKS'de gerçekleştirilen deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna ilave olarak, bir adet kollu galeri açma makinesi çalışma sahası ziyaret edilmiştir ve sahadan alınan numune üzerinde kaya kesme deneyleri gerçekleştirilerek, DKKS ile makinenin net kazı hızı kestirilmeye çalışılmıştır. Son olarak da DKKS ile karot kesme deneyinin üstünlükleri ve zayıflıkları irdelenmiştir. Sonuç olarak, DKKS ile karot kesme deneyinin rutin bir kaya mekaniği deneyi gibi gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

1. KÜÇÜK BOYUTLU KAYA KESME DENEYİ

Küçük boyutlu kaya kesme deneyi (karot kesme deneyi), Roxborough ve Philips (1974) tarafından Newcastle Upon Tyne Üniversitesi'nde geliştirilmiştir. Deneyde küçük kaya blokları ve değişen çaplarda karot numuneleri kaya kesme deneyine tabi tutulabilmektedir. Deney sırasında keskiye gelen üç boyuttaki kuvvetler (kesme kuvveti, normal kuvvet ve yanıl kuvvet), keskinin bağlı bulunduğu dinamometre ile ölçülmektedir. Deneyden elde edilen ortalama kesme kuvveti yardımı ile özgül enerji, aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$SE = \frac{FC}{Q} \quad (1)$$

Burada SE özgül enerji (MJ/m³), FC ortalama kesme kuvveti (kN) ve Q pasa miktarıdır (m³/km). McFeat-Smith ve Fowell (1979) ise bu deney düzeneginden elde edilen özgül enerji değerini kullanılarak, kollu galeri açma makinelerini (KGAM) Çizelge 1 ve 2'de görüldüğü gibi sınıflandırmıştır. Ancak, dikkat edilmesi gereken bir husus, bu sınıflamanın gerçekleştirildiği tarihe ait olduğudur, ağır ve orta ağırlıkta diye tabir edilen makinelerin günümüzde orta ve hafif makineler olarak sınıflandırıldığıdır.

Çizelge 1. Orta ağırlıktaki KGAM'lerin SE'ye göre sınıflandırılması (McFeat-Smith ve Fowell, 1979).

SE (MJ/m ³)	Orta ağırlıktaki KGAM'lerin performansı
20	Makineler bu kayaçları ancak ince bantlar halinde olması halinde kesebilir (0,3m'den az). Önemli oranda titreşimden kaynaklı olarak kısa sürede parça değişimi gerekebilir. Sert kayaç kazısı için makinede modifikasyona ihtiyaç duyulabilir.
15	Düşük kesme performansı gözlenir. Kazının delme patlatma ile desteklenmesi gerekebilir. Düzenli olarak aşınmış keskinin değişimi makine performansını artırır ve parça aşınımını azaltır. Düşük kesme hızı ile birlikte konik keskinler daha avantajlı olur.
12	Orta-düşük kesme performansı izlenir. Kırılmış keski uçları az da olsa beklenebilir. Aşındırıcı kayaçlarda keskinler izlenmelidir.
8	Orta-iyi kesme performansı ve makine parçalarının çok az aşınması beklenir. Aşındırıcı kayaçlar kazılırken keskinlerin durumu takip edilerek aşınanlar değiştirilmelidir. Eğer ayna geometrisi uygunsa radyal keskinler bu tip kayalara daha uygundur.
5	Makineler bu formasyonlara çok uygundur. Çok iyi kesme hızları beklenmektedir. Bu aralığa düşen çamurtaşları kesilmek yerine ripelenerek yüksek ilerleme hızlarına ulaşılmaktadır. Aşınmış keskinlerin düzenli olarak izlenmesi faydalı olmaktadır.

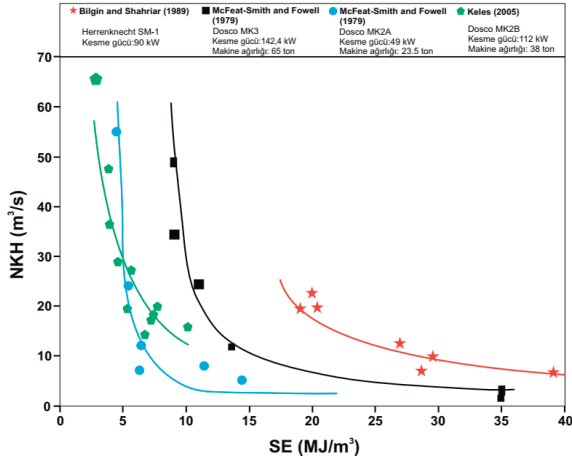
Makinenin net kazı hızının (NKH) daha kesin bir biçimde ifade edilebilmesi için, McFeat-Smith ve Fowell (1979) SE değerini kullanarak NKH'nin hesaplanabileceği bir grafik geliştirmiştir. Buna ilave olarak, çeşitli araştırmacılar da NKH ile SE arasında buna benzer ilişkiler elde etmişlerdir. Şekil 1'de çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen SE-NKH eğrileri görülmektedir.

Çizelge 2. Ağır KGAM'lerin SE'ye göre sınıflandırılması (McFeat-Smith ve Fowell, 1979).

SE (MJ/m ³)	Ağır KGAM'lerin performansı
32	Makineler bu tip kayaçları ancak ince bantlar haline olmaları şartı ile kazabilir ve keski sarfiyatının yüksek olması beklenmektedir. Makine mutlaka sert kayaç kazısına uygun olarak imal edilmiş olmalıdır.
25	Özellikle masif kazı aynalarında düşük kesme performansı beklenmektedir. Keski sarfiyatı kritiktir ve keskinlerin durumunun izlenmesi performansı iyileştirmektedir. Makinenin sert kayaç kazısına göre modifiye edilmesi arıza riskini azaltır. Konik keskinlerin kullanılması kaçınılmazdır.
17	Orta kesme performansı bu kategorinin altlarına doğru iyiye dönmektedir. Aşındırıcı kayaçlar kazılırken keskinlerin durumu düzenli olarak izlenmeli ve değiştirilmelidir. Tutarlı kesme hızları beklenmektedir.
8	Makineler bu kayaçlara çok uygundur ve çok yüksek kazı hızlarına ulaşılabilir. Bu kategorideki çamurtaşları kesilmek yerine ripelenmektedir ve iyi bir taşıma sistemi ile ilerleme hızları yükselmektedir. Keskinlerin düzenli olarak izlenmesi faydalı olmaya devam etmektedir.

Karot kesme deneyi indeks bir keski ile gerçekleştirildiği için elde edilen SE değerleri Şekil 1 ya da Çizelge 1 ve 2 dışında kullanılamamaktadır. SE değerlerinin kazı makinesi performans tahmininde sıklıkla kullanılan bir yöntem olan Rostami vd. (1994) tarafından geliştirilen model içinde kullanılamamaktadır. Bu modelde kullanılabilmesi için SE değerlerinin tam boyutlu kesme deneyinden elde edilen optimum özgül enerjiye çevrilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, Balcı ve Bilgin (2007) karot kesme deneyinden elde edilen SE değerinin optimum özgül enerji değerine çevrilebilmesi için bir eşitlik önermiştir. Bu eşitlik şu şekildedir:

$$SE_{opt} = 0,6SE + 0,68 \quad (1.2)$$



Şekil 1. Farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen eğriler

Burada, SE_{opt} optimum özgül enerji (MJ/m^3) ve SE karot kesme deneyinden elde edilen özgül enerjidir (MJ/m^3). Bu eşitlik sayesinde indeks bir değer olan karot kesme SE, Rostami vd. (1994) tarafından önerilen performans tahmini modelinde doğrudan girdi parametresi olarak kullanılabilir. Bu performans tahmin modeli aşağıda verilmiştir.

$$NKH = k \frac{P}{SE_{opt}} \quad (2)$$

Burada, NKH net kazı hızı (m^3/s), k enerji transfer oranı (0,45 ile 0,90 arasında), P makinenin kesme gücü (kW) ve SE_{opt} optimum özgül enerjidir (kWs/m^3). Bu eşitlikteki k değeri makine tipine göre seçilmektedir.

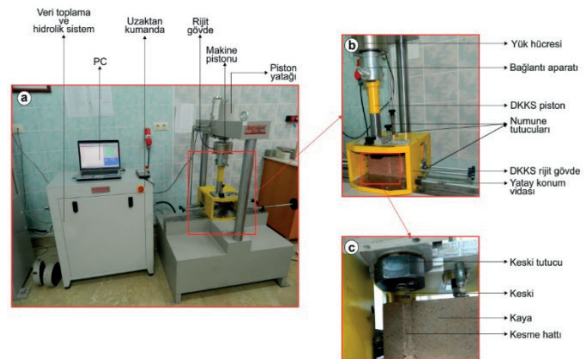
Karot kesme deneyi, 1987 yılında gerçekleşen 6. Uluslararası Kaya Mekaniği Kongresi'nde toplanan bir çalışmada, kaya kesilebilirliğinin tayini için kabul edilebilir standart bir deney olarak kabul edilmiştir (Bamford, 1987).

KGAM performans kestirimi haricinde, karot kesme deneyinden elde edilen sonuçlar farklı

amaçlar için de kullanılmıştır. Bu çalışmalar; döner kepeçli ekskavatörlerin performans tahmini (Bölükbaşı vd., 1991); kömür yan kayaçlarının sökülebilirlik açısından sınıflandırılmasıdır (Başarı ve Karpuz, 2004).

2. DÜŞEY KAYAÇ KESME SETİ (DKKS)

Düşey kayaç kesme seti (DKKS), Yaşar (2018) tarafından tasarlanarak geliştirilmiştir. Tamamen monte/demonte olabilecek şekilde tasarlanan DKKS, hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik eğilme test makine-lerine bir eklenti olarak geliştirilmiştir. Taşınabilir ve tekrar üretilebilir şekilde geliştirilen DKKS'de çeşitli keskiyer yardımcı ile kaya kesme deneylerinin başarılı bir biçimde yapılabileceği görülmüştür. Bu keskiyer; basit kama tipi keski (Yaşar ve Yılmaz, 2017a & 2017c), negatif açılı basit kama tipi keski (Yaşar ve Yılmaz, 2017a), konik uçlu keskiyer (Yaşar ve Yılmaz, 2017b) ve radyal keskiyerdir (Yaşar ve Yılmaz, 2017b). Mini-disk keskiyer ile kesme deneyleri ise hala deneme aşamasındadır. DKKS'nin bileşenleri Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. (a) Hidrolik eğilme test makinesinin genel bileşenleri ve DKKS (b) DKKS'nin bileşenleri (c) DKKS ile kayaç kesme (Yaşar ve Yılmaz, 2017a).

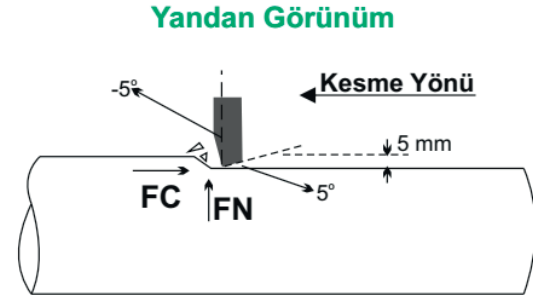
DKKS ile kaya kesme işlemi genel hatları anlatmak gerekirse, sistem tamamen bilgisayardan kontrol edilebilir. Bilgisayardan kontrol edilen eğilme gövdesinin pistonuna bağlı olan DKKS pistonu yukarı aşağı yönde hareket ettirebilmektedir. DKKS pistonunun altına monte edilen

keski tutucu ve keski sayesinde, istenilen blok ya da karot numunesi kesme deneyine tabi tutulmaktadır ve keski tarafından tecrübe edilen hareketin yönündeki kesme kuvveti (FC) eğilme gövdesinde hazır bulunan yük hücresi marifeti ile ölçülmektedir. FC'nin zamana bağlı değişimini gösteren grafik bilgisayar yardımı ile elde edilmektedir. Deneyden ortalama kesme kuvveti (FC) ve maksimum kesme kuvveti (FC') verileri elde edilebilmektedir ve sonuç olarak SE, FC yardımı ile Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmaktadır. Kaya kesme deneyleri hem etkileşimli hem de etkileşimsiz yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Deneylerde 23 cm x 20 cm x 10 cm' e kadar blok kaya numuneleri ve değişen boyutlarda karot numuneleri kullanılabilir.

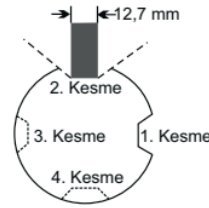
3. DKKS İLE KÜÇÜK BOYUTLU KAYA KESME DENEYİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Karot kesme deneyinin şematik gösterimi ve deney şartları Şekil 3'te verilmiştir. Deneyde negatif uç açılı bir basit kama tipi keski kullanılmaktadır. Ucun kesme açısı, ön yüzünün dikey eksenle yaptığı açı -5° 'dir. Temizleme açısı, alt yüzeyinin yatay eksenle yaptığı açı ise 5° 'dir. Keskinin genişliği 12,7 mm (1/2 inç) iken kesme deneyleri 5 mm kesme derinliğinden yapılmaktadır (Mc-Feat Smith ve Fowell, 1979). Kesme deneylerinin karotun 4 tarafından yapılması ve her numune için en az dört tekrar yapılması gerektiği öne sürülmektedir. Bazı durumlarda karot kırılması gerçekleştiği için bu her zaman mümkün olmamaktadır. Deneylerde 76 mm karot numunesi kullanılması önerilirken, 50 mm'den küçük karotların kullanılmasından kaçınılması gerektiği belirtilmektedir (Fowell, 1993). Daha önceki bir çalışmada (Yaşar, 2013; Yaşar vd., 2015), çeşitli kayaç/cevherler İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan karot kesme deney setinde kesme deneyine tabi tutulmuşlardır. Bu deneylerde kullanılan numuneler DKKS'de de karot kesme deneyine tabi tutularak iki deney düzeneğinden de elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. İstatistiksel olarak iki deney düzeneğinden elde edilen FC ve SE değerlerinin birbiri ile farkı olmadığı gösterilmiştir (Yaşar ve Yılmaz, 2017a).

Bu deneylerin sonucunda 120 MPa'a kadar olan kayaçların DKKS'de karot kesme deneyine tabi tutulabileceği görülmüştür. Şekil 4'te karot ve blok numuneler üzerinde uygulanan kesme deneyleri, deneylerde kullanılan indeks keski ve keskinin nılması gerektiği belirtilmektedir (Fowell, 1993). özellikleri görülmektedir.



Arkadan Görünüm

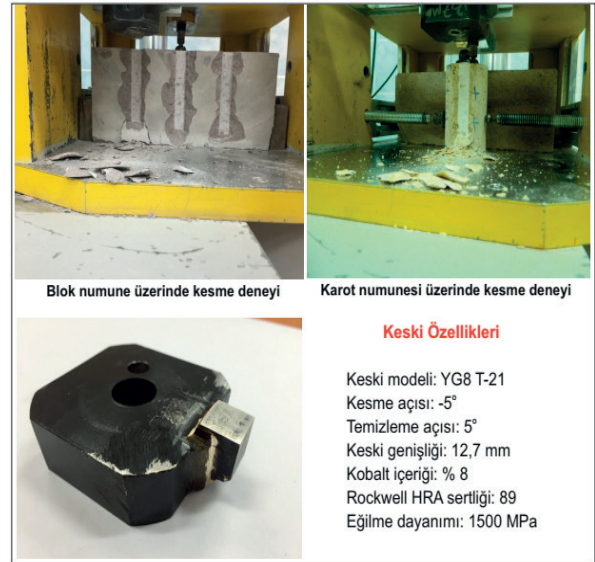


Test Koşulları:

Kesme açısı: -5°
Temizleme açısı: 5°
Kesme derinliği: 5 mm
Keski genişliği: 12,7 mm

FC: Kesme kuvveti
FN: Normal kuvvet

Şekil 3. Küçük boyutlu kaya kesme deneyinin şematik gösterimi (Fowell, 1993'ten değiştirilerek).

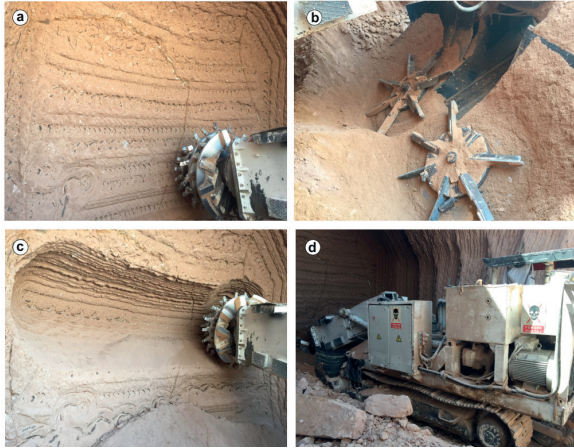


Şekil 4. DKKS'de küçük boyutlu kaya kesme deneyleri ve kullanılan keskinin özellikleri.

4. SAHA UYGULAMASI

Küçük boyutlu kaya kesme deneyinden elde edilen SE değerlerinin pratik kullanımının vurgulanabilmesi için bir adet saha çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda bir kollu galeri açma makinesi (KGAM) çalışma sahası ziyaret edilmiştir.

Bu saha Nevşehir ili Ürgüp ilçesinde bulunmaktadır. İç Anadolu Bölgesi'nde özellikle Nevşehir civarında, yeraltı soğuk hava depoları sıklıkla açılmaktadır. Bu yeraltı depolarının kazısında genellikle kollu galeri açma makineleri (KGAM) kullanılmaktadır. Bu sahada yerel üretici tarafından imal edilen bir KGAM çalışmaktadır. Geçilen formasyon kristal tüftür ve kazı aynası toplamda iki adet süreksizlik içerdiği için masif olarak kabul edilmiştir. Kullanılan KGAM Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. (a) KGAM kesici kafa ve aynanın durumu (b) KGAM toplayıcı ünitesi (c) KGAM'nin kazı sırasındaki görüntüsü (d) KGAM'nin genel görünüşü (Yaşar, 2018).

Bu sahada makinenin çalıştığı aynadan blok numuneler temin edilmiştir ve KGAM'nin kazı hızı yerinde kaydedilmiştir. KGAM yerli üretim bir makine olup kesme gücü 110 kW'tır ve aksiyel tip bir kesici kafaya sahiptir. Bu makinenin kesici kafası radyal keskinlerle donatılmış olup, kayacın dayanımının çok düşük olmasından ve diğer keskinlerle yapılan çalışmalar sonucu konik ya da radyal keski ile yapılan deney sonuçlarının çok farklı olmadığından görülmesinden dolayı bu çalışma kapsamında kullanılabilirliği düşünülmüştür.

Sahadan elde edilen blok numunelerden karot örnekleri çıkarılarak, bu örnekler üzerinde kaya mekaniği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna ilaveten, kazı aynasından alınan blok numuneler üzerinde, laboratuvarında küçük boyutlu kaya kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaya kesme deneyleri Şekil 6'da görülen küçük blok numune üzerinde yapılmıştır. Bu blok üzerinde toplam üç adet kesme deneyi yapılmıştır ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Çizelge 3'te kaya mekaniği ve kaya kesme deneylerinin sonuçları toplu olarak verilmiştir.



Şekil 6. Kristal tüf numunesinin kesme deneyine tabi tutulması

Çizelge 3. Kristal tüf numunesinin mekanik özellikleri ve kesme deneyinin sonucu

σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	SE (MJ/ m ³)	SE _{opt} (MJ/m ³) (Eşitlik 2)
2,44 ± 0,3 (5*)	0,74 ± 0,18 (10*)	2,03 ± 0,31 (3*)	1,90

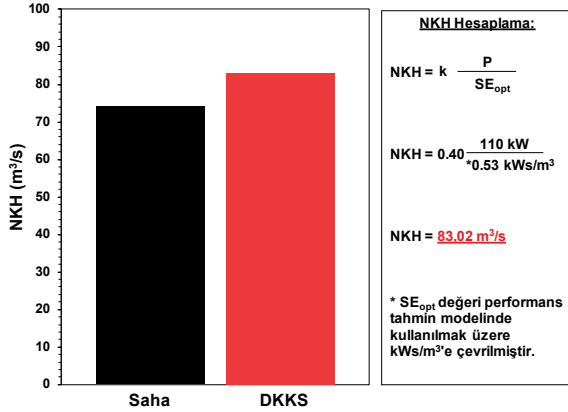
σ_c = Tek eksenli basınç dayanımı

σ_t = Dolaylı çekme dayanımı

* Deney sayısı

Sahada gerçekleşen net kazı hızı 74,07 m³/saat'tir. Makinenin kazı hızı ölçülürken, Şekil 5(c)'de görülen oyuğun kazılmasında geçen süre ve kazılan hacim göz önüne alınmıştır. Bu kazı hızı Rostami vd. (1994) tarafından önerilen performans tahmin modeli ile tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çizelge 3'ten görülebileceği gibi karot kes-

me deneyinden elde edilen SE değeri, Eşitlik 2 yardımı ile optimum özgül enerji (SE_{opt}) değerine çevrilmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen SE_{opt} değeri, Eşitlik 3'te verilen performans tahmini modelinde yerine konularak net kazı hızı tahmin edilmiştir ve sonuçlar Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. DKKS ile yapılan performans tahmin sonuçları

Şekil 7'den da görülebileceği gibi sahadaki kazı hızı gerçeğe yakın bir biçimde tahmin edilmiştir. Sahada kaydedilen kazı hızı 74,07 m³/saat iken, DKKS ile tahmin edilen değer 83,02 m³/saat'tir. Enerji transfer oranı (k) kollu galeri açma makineleri (KGAM) için genellikle 0,45-0,55 arasında seçilmektedir. Bu değer, kabaca aksiyel tip makineler için 0,45, tambur tipi makineler için ise 0,55 olarak seçilmektedir. Ancak, bu çalışmada k değeri Bilgin vd. (2005)'in önerileri doğrultusunda 0,4 olarak kabul edilmiştir.

5. GENEL DEĞERLENDİRME

Kaya kesme deneyleri, kesilebilirlik ya da performans tahmininde kullanılan en önemli ve kesin yöntemlerdir. Ancak, çok az sayıda merkezde bulunmaktadır. Bundan dolayı, araştırmacılar çeşitli alternatif yöntemlere yönelmektedirler (tek eksenli basınç dayanımı deneyi ya da alternatif kesme düzenekleri gibi). Bu tip kaya mekaniği deneyleri statik kaya mekaniği prensiplerini takip etmektedir ve birçok deneysel parametreden etkilenmektedir (Fowell, 1993; Fowell vd., 1994). Bu parametrelere; boy:çap oranı, yükleme hızı, nu-

mune yüzey kalitesi vs. gösterilebilir. Ayrıca, kaya kesmedeki çatlak oluşum mekanizmasını temsil etme imkânları bulunmamaktadır. Bundan dolayı, standart kaya mekaniği deneyleri, kaya kesmedeki gerçek durumu temsil edememektedir. DKKS sayesinde kaya kesme deneyleri daha kolay bir şekilde uygulanabilir. Bir kaya kesme deneyinde bulunması gereken özellikler Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği (ISRM) tarafından düzenlenen çalıştayda şu şekilde belirtilmiştir (Bamford, 1987):

- Sahada kazı yapan makinenin kestiği kayaç spektrumu deneyde kesilebilmelidir. Yani, KGAM 120 MPa'a kadar dayanımlı kayaçları kazdığı varsayılırsa bu amaç için imal edilen bir deneyde 120 MPa'a kadar dayanıma sahip olan kayaçlar deneye tabi tutulabilmelidir,
- Deney güvenilir olmalıdır,
- Deneyin yapılışı kolay, hızlı ve ucuz olmalıdır,
- Deney yöntemi farklı araştırmacılar tarafından tekrar üretilebilir olmalıdır.
- Deneyde küçük boyutlarda numuneler kullanılmalıdır.

KGAM'ler genellikle 120 MPa'a kadar tek eksenli basınç dayanımına sahip kayaçları kazabilirler. Daha önceki çalışmalarda (Yaşar ve Yılmaz, 2017a) 120 MPa'a kadar numunelerin (fosilli kumtaşı) DKKS'de kaya kesme deneyine tabi tutulabileceği görülmüştür. Buna ek olarak, deneyden elde edilen kuvvet verilerinin doğruluğu, hem harici bir yük hücresi ile hem de diğer bir kesme düzeneğinden elde edilen veriler ile doğrulanmıştır. DKKS'de bir kaya kesme deneyi, sıradan ve rutin bir kaya mekaniği deneyi (tek eksenli basınç dayanımı vb.) gibi uygulanabilmektedir. Deney yönteminin diğer araştırmacılar tarafından tekrar üretilerek uygulanması imkânı bulunmaktadır. Deneyde küçük blok ya da karot numuneleri kesme deneyine tabi tutulabilmektedir ki bir projenin jeoteknik tasarım safhasında, yalnızca karot numuneleri elde hazır bulunmaktadır. Bu bilgiler ışığında, DKKS'nin çalışma grubu tarafından önerilen kriterlerin hepsini sağladığı sonucuna varılabilir.

Deney yöntemi ile ilgili birtakım dezavantajlar göze çarpabilir. İlk olarak, yalnızca tek eksende ki, yani hareketin yönündeki, kesme kuvvetinin ölçülüyor olması bir eksiklik olarak gösterilebilir. Ancak karot kesme deneyi ve performans tahmini uygulamasında bu durumun herhangi bir tehdit yaratmayacağı açıktır.

Diğer yandan, kesme hızı ve veri okuma hızı, deneyden elde edilecek verilerin kalitesini tehdit edebileceği öne sürülebilir. DKKS ile kaya kesme deneylerinde kesme hızı 0,5-1 cm/s civarındadır ve veri okuma hızı ise 50 Hz'dir. Bu durum diğer çalışmalarda detaylı bir şekilde ele alınarak tartışılmıştır (Yaşar, 2018; Yaşar ve Yılmaz, 2017b). Ancak burada kısaca değinmek gerekirse, kaya kesmede, kesme hızının kesme kuvveti üzerine herhangi bir etkisinin olmadığı açıkça bilinen bir gerçektir ve tartışmaya açık değildir (Potts ve Shuttleworth, 1959; O'Dogherty ve Burney, 1963; Roxborough, 1973; Roxborough, 1985; Nishimatsu, 1993). Bunun ana nedeni, kaya kesmedeki çatlak oluşum hızının (örneğin 500 m/s), kaya kesme hızından hem sahada hem de laboratuvarında yüzlerce kat fazla olmasıdır. Bundan dolayı, kesme hızının veri kalitesine etki edeceği iddia edilemez.

Son olarak da kaya kesmede veri okuma hızının veri kalitesi üzerine etkisi ile ilgili ne yazık ki yapılmış bir çalışma yoktur. Yalnızca Bilgin vd. (2014) veri okuma hızının 1000 Hz olması gerektiğini belirtmektedir. Ancak farklı araştırmacılar 50-1000 Hz arasında değişen hızlarda veri okuma sistemi olan düzeneklerde kaya kesme deneylerini gerçekleştirmektedirler (Kim, 2010; Richard vd., 2012; Entacher vd., 2014; Bilgin vd., 2006). Ayrıca, bu durum da Yaşar (2018)'de detaylı bir biçimde tartışılarak, iki farklı deney düzeneğinden elde edilen veriler karşılaştırılarak irdelenmiştir ve veri okuma hızının da herhangi bir tehdit oluşturmayaacağı sonucuna varılmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, taşınabilir, seri üretime uygun ve hemen hemen her kaya mekaniği laboratuvarında bulunan hidrolik eğilme test makinelerine

bir eklenti olarak geliştirilen DKKS ile küçük boyutlu kaya kesme deneyinin gerçekleştirilmesi vurgulanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen bulgular ışığında, DKKS'de küçük boyutlu kaya kesme setinin başarılı bir biçimde yapılabileceği görülmüştür. Bu sayede hem kollu galeri açma makinelerinin performans tahmini hem de 2. Bölüm'de bahsedilen diğer konular (döner kepçeli ekskavatörlerin performans tahmini, kömür yan kayaçlarının sökülebilirlik açısından sınıflandırılması) ile ilgili çalışmalar, taşınabilir bir kaya kesme setinde kolaylıkla yapılabilecektir. Buna ilave olarak, küçük boyutlu kaya kesme deneyinden elde edilen verilerin sahada uygulanmasına örnek teşkil etmesi açısından, bir KGAM çalışma sahasından elde edilen numunelerle, makinenin net kazı hızı kestirilmeye çalışılmıştır. DKKS'de gerçekleştirilen kaya kesme deneyleri ile gerçekleştirilen performans tahmini sonucunda KGAM'nin kazı hızının gerçeğe çok yakın bir biçimde tahmin edilebildiği görülmüştür. Sonuç olarak da kaya kesme deneylerinin rutin bir kaya mekaniği deneyi gibi gerçekleştirilebileceği vurgulanmıştır.

KAYNAKLAR

Balcı, C. , Bilgin, N., 2007. Correlative Study of Linear Small and Full Scale Rock Cutting Tests to Select Mechanized Excavation Machines. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 44, 468-476.

Bamford, W.E., 1987. Workshop On Rock Cuttability And Drillability. International Congress on Rock Mechanics, G. Herget ve S. Vongpaisal, Ed., Montreal, Volume 3, 1508-1510.

Başarı, H., Karpuz, C., 2004. A Rippability Classification System for Marls in Lignite Mines. Engineering Geology, 74, 303-318.

Bilgin, N., Shahriar K., 1989. İstanbul Haliç Tünelinin Sürülmesinden Elde Edilen Sonuçlar. Türkiye Madencilik Bilimsel ve Teknik 11. Kongresi, Ankara, 306-319.

Bilgin, N., Tümaç, D., Feridunoğlu, C., Karakaş, A.R., Akgül, M., 2005. The Performance of a

Roadheader in High Strength Rock Formations in Kucuksu Tunnel. 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, Istanbul, Turkey, 815–820.

Bilgin, N., Demircin, M.A., Çopur, H., Balci, C., Tunçdemir, H., Akçin, N., 2006. Dominant Rock Properties Affecting the Performance of Conical Picks and the Comparison of Some Experimental and Theoretical Results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 43, 1, 139–156.

Bilgin, N., Balci, C., Tumac, D., Feridunoglu, C., Copur, H., 2010. Development of a Portable Rock Cutting Rig for Rock Cuttability Determination. *EUROCK 2010, Lausanne*, pp. 405–408.

Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2014. *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. CRC Press, 366 s.

Bölükbaşı, N., Koncagül, O., Paşamehmetoğlu, A.G., 1991. Material Diggability Studies for the Assessment of Bucket Wheel Excavator Performance. *Mining Science and Technology*, 13, 271-277.

Detournay, E., Drescher, A., Hultman, D.A., 1997. *Portable Rock Strength Evaluation Device*. United States Patent 5670711.

Entacher, M., Lorenz, S., Galler, R. 2014. Tunnel Boring Machine Performance Prediction with Scaled Rock Cutting Tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 70, 450–459.

Fowell, R.J., 1993. *The Mechanics of Rock Cutting*. *Comprehensive Rock Engineering*, J.A. Hudson, vol 4. Pergamon, Oxford, 155–176.

Fowell, R.J., Richardson, G., Gollick, M.J., 1994. *Rock Cutting with Roadheaders*. *Tunnelling*, 785-796.

Keleş, S., 2005. *Cutting Performance Assessment of a Medium Weight Roadheader at Cayırhan Coal Mine*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, p 58.

Kim, E., 2010. *Investigation of Conical Bit Rotation in Full Scale Cutting Tests*. PhD Thesis, The Pennsylvania State University, 143 s.

McFeat-Smith, I. Fowell, R. J., 1979. *The Selection and Application of Roadheaders for*

Rock Tunneling. *Rapid Excavation Tunneling Conference*, Georgia, 1, 261-279.

Nishimatsu, Y., 1993. *Theories of Rock Cutting, Comprehensive Rock Engineering*. J.A. Hudson, Ed., Oxford, Pergamon Press, 647-662.

O'Dogherty, M.J., ve Burney, A.C., 1963. *A Laboratory Study of the Effect of Cutting Speed on the Performance of Two Coal Cutter Picks*. *Colliery Eng. (London)* 40, 51-54,111-114.

Potts, E.L.J., ve Shuttleworth, P., 1959. *A Study of Ploughability of Coal With Special Reference to the Effects of Blade Shape, Direction of Planning to the Cleat, Planning Speed and Influence of Water Infusion*. *Transactions of the Institution of Mining Engineers*, 117, 519-553.

Richard, T., Dagrain, F., Poyol, E., Detournay, E., 2012. *Rock Strength Determination From Scratch Tests*, *Engineering Geology*, 147-148, 91-100.

Rostami, J., Özdemir, L., Neil, D., 1994. *Performance Prediction: The Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining*, *Mining Engineering*, 1263-1267.

Rostami, J., Ozdemir, L., 1996. *Computer Modeling of Mechanical Excavators Cutterhead*. *Proceedings of the World Rock Boring Association Conference: Mechanical Excavation's Future Role in Mining*, 17–19 Eylül, Laurentian University, Sudbury, Ontario, Kanada.

Roxborough, F.F., Rispin, A., 1973. *The Mechanical Cutting Characteristics of the Lower Chalk*. *Tunnels and Tunnelling*, January, 45-67.

Roxborough, F.F., Philips H.R., 1974. *Experimental Studies on the Excavation of Rocks Using Picks*, *Advances in Rock Mechanics*. Third ISRM Congress, Denver, 1407-1412.

Roxborough, F.F., 1985. *Research in Mechanical Rock Excavation: Progress and Prospects*. *RETC, Las Vegas*, 225–244.

Stavropoulou, M., 2006. *Modeling of Small-Diameter Rotary Drilling Tests on Marbles*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*,43: 1034–1051.

Yaşar, S., 2013. *Doğu Karadeniz Bölgesinde Bulunan Çeşitli Kayaçların ve Cevherlerin Kazılabilirlik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek

Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Yaşar, S., 2018. Kayaç Kesilebilirliğinin Tayini için Düşey Kayaç Kesme Setinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Yaşar, S., Çapık, M., Yılmaz, A.O., 2015. Cuttability Assessment Using the Drilling Rate Index (DRI). *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 74, 4, 1349–1361.

Yaşar, S., Yılmaz, A.O., 2017a. A Novel Mobile Testing Equipment for Rock Cuttability

Assessment: Vertical Rock Cutting Rig (VRCR). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 4, 857-869.

Yaşar, S., Yılmaz, A.O., 2017b. Vertical Rock Cutting Rig (VRCR) Suggested for Performance Prediction of Roadheaders,. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, DOI: 10.1080/17480930.2017.1363482.

Yaşar, S., Yılmaz, A.O., 2017c. Rock Cutting Tests with a Simple-Shaped Chisel Pick to Provide Some Useful Data. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 12, 3261-3269.



Orijinal Araştırma / Original Research

MURGUL BAKIR CEVHERİNİN ÖN ZENGİNLEŞTİRMESİNDE ALTERNATİF YAKLAŞIMLAR

ALTERNATIVE APPROACHES TO PRE-CONCENTRATION OF MURGUL COPPER ORE

Özgür Özcan^{a,*}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 16 Ocak / January 2018
Kabul Tarihi / Accepted : 19 Şubat / February 2018

Anahtar Sözcükler:

Kabaran yataklı ayırıcı (KYA),
Altın,
Bakır,
Murgul,
Engelli çökeltme.

Keywords:

Teetered bed separator (TBS),
Gold,
Copper,
Murgul,
Hindered settling.

ÖZ

Bu çalışmada, Murgul bakır cevherinden laboratuvar ölçekli bir kabaran yataklı ayırıcı (KYA) ile ön zenginleştirme olanakları incelenmiştir. Ayrıca işletme değişkenlerinin cevher içerisindeki farklı mineraller üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar cevherdeki kuvarslı flotasyon öncesinde yüksek miktar ve verim değerinde uzaklaştırıldığını göstermektedir. KYA alt akımı altın ve sülfür verimleri benzerlik göstermektedir. Basınç set değerinin artması alt akım altın ve sülfür tenör ve verimini arttırmıştır. Ancak yıkama suyu miktarındaki artış alt akım altın ve sülfür veriminde önemli bir düşüşe yol açmıştır. KYA testleri farklı yoğunluklara sahip minerallerin engelli çökeltme koşulları altındaki davranımının ortaya konması konusunda önemli sonuçlar sunmaktadır. En yüksek altın ve sülfür verimine sahip KYA alt akım ürünü ön konsantre olarak sallantılı masa testine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre sallantılı masa beslemesinin ağırlıkça %11,63'ü 4,39 ppm altın tenörü ve %64,42 verim ile nihai konsantre olarak alınmaktadır. Bu koşuldaki konsantre %48,46 gibi yüksek bir sülfür tenörüne de sahiptir.

ABSTRACT

In this study, pre-concentration possibilities of Murgul copper ore was investigated by using a laboratory scale teetered bed separator (TBS). Also effect of operational parameters on different minerals in the ore was evaluated. Results indicated that silica removal achieved in high mass and recovery before flotation. Gold and sulfur recoveries of TBS underflow was similar. An increase in pressure set point increases gold and sulfur recovery of TBS underflow. But an increase in teeter water rate decreases gold and sulfur recovery of TBS underflow. TBS tests were presented significant results about behavior of different density minerals under hindered settling conditions. The TBS underflow product which has highest gold and sulfur recovery was subjected to shaking table test as a pre concentrate. According to test results 11.63% of the shaking table feed can be concentrated with 4.39 ppm gold grade and 64.42% recovery as a final concentrate. The concentrate has also a higher sulfur grade as 48.46%.

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

GİRİŞ

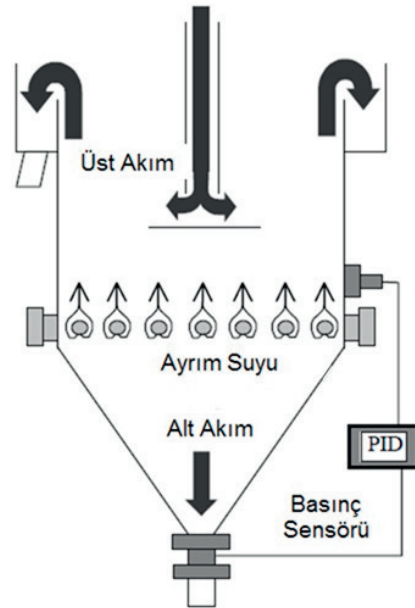
Altın doğada genellikle saf veya elektrik denilen altın-gümüş alaşımı olarak bazen de tellüridler halinde bulunur. Minerallerin kristal kafeslerinde kendisine kimyasal olarak benzeyen elementlerle, örneğin, bakır, gümüş ile yer değiştirebilir veya pirit (FeS_2), arsenopirit ($FeAsS$), kalkopirit ($CuFeS_2$), stibnit (Sb_2S_3), orpiment (As_2S_3) ve realgar (AsS) gibi minerallerde küçük kapanımlar halinde de gözlenir.

Ülkemizdeki altın zenginleşmelerini ise; Cu-Pb-Zn yatakları içindeki zenginleşmeler, epitermal oluşumlar, ultramafik kayalar içindeki listvenitik oluşumlar ve plaser tipi zenginleşmeler şeklinde gruplandırmak mümkündür. Altın içeriği yüksek masif sülfid yatakları arasında, Küre Bölgesi Cu yatakları, Artvin Bölgesi Cu yatakları (Murgul, Cerattepe, Akarşen vb.) ve Elazığ Bölgesi Cu yatakları sayılabilir (Erler, 1993; Karabalık, 1994). Bu yataklardan üretilen metalik bakırın elektrolizi sırasında bir miktar altın da kazanılabilmektedir.

Altın cevherlerinin zenginleştirilmesinde kullanılan yöntemler; yerçekimi ile zenginleştirme, flotasyon, amalgamasyon ve siyanür liçidir. Zenginleştirme yönteminin seçimi; cevherin mineralojik, jeolojik, metalurjik özellikleri ile çevresel ve coğrafik faktörler değerlendirilerek yapılır (Ünal vd., 2016).

KYA'lar dünyanın bazı bölgelerinde kömür yıkama tesislerinde kullanılmaktadır (Kumar vd., 2013). Literatürde farklı cevherler ile yürütülen çalışmalarda ise kromit ve nefelinli siyanit zenginleştirmede (Özcan, 2017), demir ve kromit atıklarının değerlendirilmesinde (Ozcan ve Celik 2016; Kumar vd. 2009) ve manganez cevherinin zenginleştirilmesinde (Triphaty vd., 2013) başarılı sonuçlar alınmıştır. KYA'lar ayrıca ön zenginleştirme uygulamalarında da kullanılmıştır (Sarkar vd., 2008a). Bunun yanı sıra yapay bir manyetit kuvars karışımı ile zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür (Ozcan ve Ergun 2017a). Elde edilen sonuçlar yüksek yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinde KYA alt akımından %67.58 Fe tenörlü bir konsantrenin, %77.86 verim değeri ile alınabileceğini göstermiştir. Ancak bu koşulda, yoğunluğu yüksek ancak çökme hızı nispeten düşük ince manyetit tanelerinin üst akımdan kaybedildiği belirlenmiştir.

Hidrolik sınıflandırıcılar grubunda yer alan KYA'lar temel olarak yukarı yönde verilen ayırım suyunun karşılık beslemenin yerçekimi etkisi altında ve engelli çökme koşulları içerisinde çökelme hızı, çökme esnasında tanelerin boyut ve yoğunluk farklarından yararlanılarak ayrıldığı ekipmanlardır. Çalışma anında, çökme hızı yukarı yönlü su hızına yakın olan taneler ayırıcı içerisinde birikerek ağır ortam gibi davranan akışkan bir malzeme yatağı oluşturmaktadır. Akışkan yatak içerisinde biriken ve ağır ortam gibi davranan bu malzeme yatağının varlığı nedeniyle, ayırıcıya beslenen tanelerin çökme hızları da düşmektedir. Sistem içerisinde biriken ve nispeten malzeme yatağının üst bölgelerinde kalan yoğunluğu düşük/ince taneler yıkama suyunun hidrolik taşıma kuvveti ile üst akıma sevk edilirken, malzeme yatağının alt bölgelerinde kalan yoğunluğu yüksek/iri taneler ise hem yatak ağırlığının hem de yerçekiminin etkisi ile alt akımdan alınırlar (Şekil 1). Kolon içerisindeki akışkan yatak yüksekliği bir basınç sensörü tarafından sürekli ölçülmektedir. İstenilen yatak yüksekliğine ulaşıldığında otomatik bir PID (oransal-integral-türevsel) denetleyicisi yardımıyla alt akım ucunda bulunan hava kontrollü vana açılıp kapatılarak fazla katı alt akımdan sistemi terk eder ve bu sayede yatak yüksekliği sabit kalır. Alt akımdan alınan malzeme yüksek katı içeriğine sahiptir.

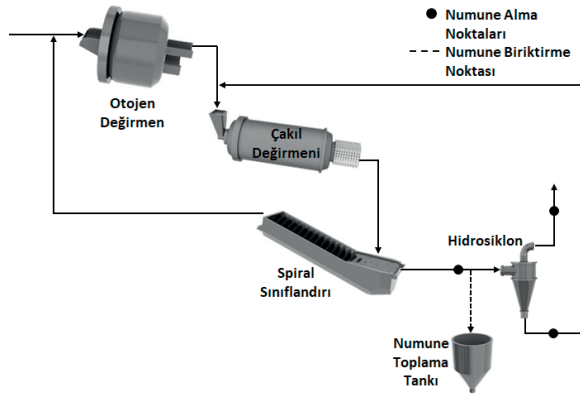


Şekil 1. Kabaran yataklı ayırıcının şematik görünümü

Bu çalışmanın amacı, yüksek kuvars içeriğine sahip Murgul Çakmakkaya bakır cevherinin ön zenginleştirme alternatiflerinin araştırılmasıdır. Deneysel çalışmalarda KYA'nın mevcut akım şemasındaki flotasyon devresi öncesi ya da alternatif bir akım şemasında sallantılı masa öncesi bir ön zenginleştirici olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Ayrıca KYA'nın temel işletme değişkenleri olan yıkama suyu miktarı ve basınç set değeri ile cevherden flotasyon öncesi kuvars uzaklaştırma ve KYA-sallantılı masa kullanılarak metal kazanım performansı arasındaki ilişkiler de belirlenmiştir.

1. TESİS ÇALIŞMALARI

Bakır cevheri öğütme devresine ait basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Bakır öğütme devresi basitleştirilmiş akım şeması ve numune alma noktaları

Öğütme devresinde bir adet 6x2 m otojen değirmen, bir adet 3x5.7 m çakıl değirmeni, bir adet spiral sınıflandırıcı ve iki adet 370 mm çapında hidrosiklon bulunmaktadır. Taze besleme otojen değirmende öğütülmekte ve siklon irisi ile birleşerek çakıl değirmenine beslenmektedir. Çakıl değirmen çıkışı spiral sınıflandırıcı ile sınıflandırılmaktadır. Spiral irisi otojen değirmene dönerken spiral incesi ise siklona beslenmektedir. Siklon incesi ürün flotasyon beslemesini oluşturmaktadır.

Tesis çalışmaları kapsamında devrede yer alan siklon beslemesinden uzun süreli numune toplanmıştır. Ayrıca normal çalışma koşulları altında siklon etrafından madde denkleğinin kurulması için, tüvenan cevherden ise mineralojik

analizler için numuneler alınmıştır. Numune alma çalışmalarına başlamadan önce normal çalışma koşullarında devrenin kararlı durumda olup olmadığının takip edilmesi amacıyla kontrol odasında besleme tonajı, değirmen motor akımı, siklon basıncı, gibi parametrelerin zamana bağlı değişimi gözlenmiştir. Devrenin tamamen kararlı durumda olduğuna karar verildikten sonra, siklon beslemesi, alt akımı ve üst akımından eş zamanlı temsili numuneler alınmıştır. Daha sonra siklonun alt akım ucu tıkanarak siklon besleme numunesi üst akımdan yaklaşık 1000 lt hacimli bir tanka alınmıştır. Tank içerisindeki numunenin suyu süzülerek laboratuvar ölçekli KYA testlerinde kullanılmak üzere hazırlanmıştır.

KYA testleri için seçilen numune biriktirme noktası ayrı bir önem arz etmektedir. Özellikle kapalı devre öğütme uygulamalarında altın, gümüş, demir vb. içeren taneler yüksek yoğunlukları nedeniyle sınıflandırıcı alt akımına gitme eğilimi göstermektedir. Bu taneler siklon üst akımından ürün olarak alınmadan önce ise öğütme boyundan çok daha ince boylara inmektedir. Bunun sonucu olarak bir sonraki zenginleştirme devresinin verimlerinde büyük düşüşler gözlenmektedir. Bu tür tanelerin sistemden mümkün olan en iri boyda çıkarılması hem aşırı öğütme için harcanan enerji miktarının düşürülmesini hem de değerli tanelerin verimli şekilde kazanılabileceği boydan daha ince boylara inerek şlam oluşturmasını engelleyecektir (Kawatra ve Eisele, 2005).

2. MALZEME KARAKTERİZASYONU

Malzeme karakterizasyonu kapsamında tüvenan cevher üzerinde gerçekleştirilen mineralojik analizler cevherin pirit, kalkopirit, sfalerit ve molibdenit mineralleri içerdiğini göstermiştir. Cevherin yan kayacı ise temel olarak kuvarstan oluşmaktadır. Kuvarsin yanı sıra çok az miktarda kalsit-dolomit ve barit de içermektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan siklon besleme numunesine ait kimyasal analiz sonuçları ise Çizelge 1'de sunulmaktadır.

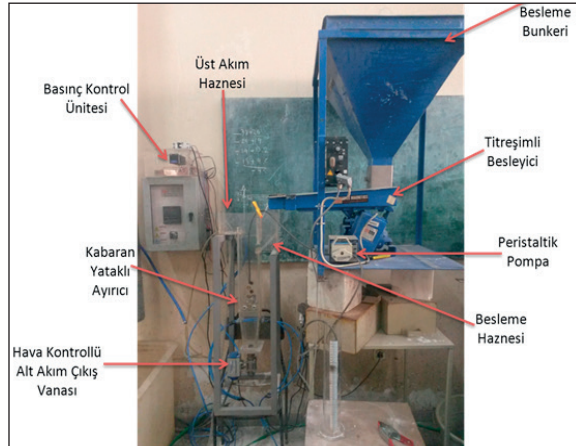
Çizelge 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan siklon beslemesi kimyasal analiz sonuçları

Cu (%)	Zn (%)	Au (ppm)	SiO ₂ (%)	S (%)
0,84	0,05	0,60	70,47	12,24

Çizelge 1 incelendiğinde siklon beslemesinin çok büyük oranda kuvars içerdiği, aynı zamanda %12 gibi bir S tenörü olduğu görülmektedir. Siklon beslemesinin altın tenörü ise 0,60 ppm'dir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tesiste yer alan siklon beslemesinden toplanan numuneler ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar yer almaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan laboratuvar ölçekli KYA, 100 mm x 100 mm kesit alanına sahiptir. 500 mm yüksekliğindeki ayırım kolonunu 200 mm'lik susuzlandırma konisi takip etmektedir. KYA testlerinde öncelikle her bir test için istenilen yıkama suyu miktarı ayarlanmıştır. Ardından test malzemesi ayırıcıya beslenerek istenilen basınç değerine ulaşana kadar sistem açık devre çalıştırılmıştır. İstenilen basınç değerinin elde edilmesinin ardından sistem 20 dakika daha çalıştırılarak kararlı duruma gelmesi sağlanmıştır. Sistemin kararlı duruma gelmesinin ardından eş zamanlı olarak besleme, alt ve üst akışlardan 20 dakika boyunca kesikli numuneler alınmıştır. Alınan tüm numunelerin tane boyu dağılımları ve katı içerikleri belirlenmiş, kimyasal analizleri yapılmıştır. KYA deney düzeneği Şekil 3'te, KYA test koşulları ise Çizelge 2'de sunulmaktadır.



Şekil 3. KYA test düzeneği

KYA ile gerçekleştirilen testler sırasında besleme miktarı (500 g/dk) ve katı oranı (%25) sabit tutulmuştur. KYA testlerinden elde edilen en iyi tenör-verim ilişkisine sahip alt akım ürünü nihai zenginleştirme için sallantılı masa testine tabi tutulmuştur. Sallantılı masa test koşulları Çizelge 3'te sunulmaktadır.

Çizelge 2. KYA test koşulları

Test No.	Yıkama Suyu Miktarı (L/dk)	Basınç Set Değeri
1	2	120
2	2	140
3	2	160
4	6	120
5	6	140
6	6	160

Çizelge 3. Sallantılı masa test koşulları

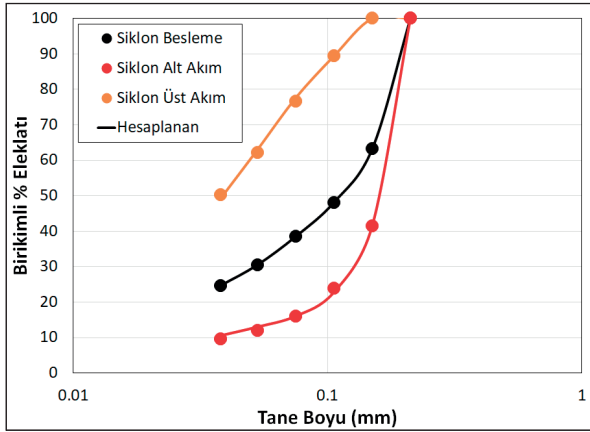
Test Koşulları	
Besleme Katsısı (%)	30
Yıkama Suyu Miktarı (L/dk)	10
Masa Eğimi (°)	5

4. MADDE DENKLİĞİ ÇALIŞMALARI

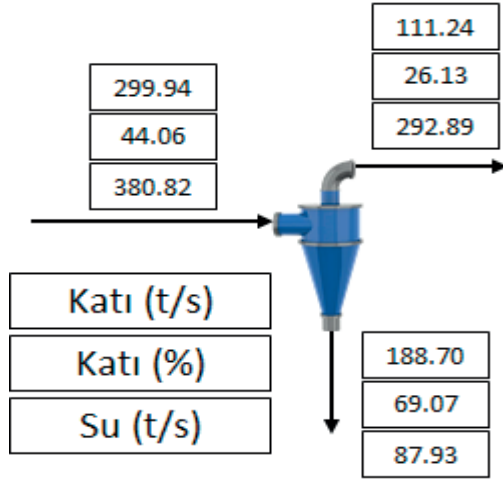
Herhangi bir örnekleme çalışması sırasında, sistemin dinamik yapısından, fiziksel koşullardan, ölçüm hatalarından ve insan faktöründen kaynaklanan bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denkliği, ham verilerin istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak, devre etrafındaki akış ve tenör değerlerinin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

Tesis çalışmalarından ve laboratuvar ölçekli çalışmalardan elde edilen veriler kullanılarak her bir numune alma koşulu için madde denkliği oluşturulmuştur.

Tesis çalışmaları kapsamında madde denkliği kullanılarak siklon etrafı tane boyu dağılımları istatistiksel olarak hatalardan arındırılarak düzeltilmiş ve bu değerler kullanılarak siklonun normal çalışma koşullarında akış değerleri (tonaj) hesaplanmıştır. Siklon etrafında hesaplanan tane boyu dağılımları ile tonaj değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmektedir. Şekil 4'te yer alan grafikte ölçülen değerler noktalar, madde denkliği ile hesaplanan değerler ise çizgiler ile gösterilmektedir. Tüm değerlerin birbirine oldukça yakın olması numune alma çalışmalarının başarı ile yürütüldüğünü ortaya koymaktadır.



Şekil 4. Siklon etrafı ölçülen-hesaplanan tane boyu dağılımları



Şekil 5. Siklon etrafı hesaplanan tonaj değerleri

Siklon etrafında yapılan madde denkleği sonucunda siklon beslemesinin yaklaşık 300 t/s olduğu, ağırlıkça %63'ünün ise siklon alt akımından alındığı görülmektedir. Ayrıca siklon beslemesindeki suyun ağırlıkça %23'ü de siklon altına kaçak yapmaktadır. Bu sonuç önemli miktarda besleme malzemesinin hiçbir sınıflandırmaya maruz kalmadan alt akıma kaçak yaptığı anlamına gelmektedir.

Laboratuvar ölçekli KYA test sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan akış ve tenör değerleri Çizelge 4'te verim değerleri ise Çizelge 5'te sunulmaktadır.

Sallantılı masa test sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan akış ve tenör değerleri ise Çizelge 6'da sunulmaktadır.

Çizelge 4. KYA madde denkleği sonuçları

Alt Akım Tenör Değerleri						
Test No.	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (ppm)	SiO ₂ (%)	S (%)
1	73,32	0,75	0,06	0,62	69,72	11,59
2	67,78	0,91	0,06	0,70	67,83	12,88
3	61,66	1,04	0,07	0,79	64,99	15,15
4	45,03	1,21	0,06	0,81	60,79	16,05
5	39,72	1,28	0,07	1,01	55,80	19,92
6	28,57	1,61	0,10	1,52	41,56	30,10

Üst Akım Tenör Değerleri						
Test No.	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (ppm)	SiO ₂ (%)	S (%)
1	26,68	1,09	0,01	0,54	72,52	14,03
2	32,22	0,69	0,04	0,40	76,02	10,89
3	38,34	0,52	0,01	0,29	79,29	7,56
4	54,97	0,54	0,04	0,43	78,40	9,12
5	60,28	0,55	0,04	0,33	80,14	7,18
6	71,43	0,53	0,03	0,23	82,04	5,10

Çizelge 5. KYA verim değerleri

Alt Akım Verim Değerleri						
Test No.	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (%)	SiO ₂ (%)	S (%)
1	73,32	65,43	93,37	76,07	72,55	69,42
2	67,78	73,51	76,37	78,57	65,25	71,34
3	61,66	76,34	91,87	81,49	56,86	76,32
4	45,03	64,99	54,96	60,80	38,84	59,04
5	39,72	60,52	57,16	66,85	31,45	64,65
6	28,57	54,61	58,31	72,44	16,85	70,26

Üst Akım Verim Değerleri						
Test No.	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (%)	SiO ₂ (%)	S (%)
1	26,68	34,57	6,63	23,93	27,45	30,58
2	32,22	26,49	23,63	21,43	34,75	28,66
3	38,34	23,66	8,13	18,51	43,14	23,68
4	54,97	35,01	45,04	39,20	61,16	40,96
5	60,28	39,48	42,84	33,15	68,55	35,35
6	71,43	45,39	41,69	27,56	83,15	29,74

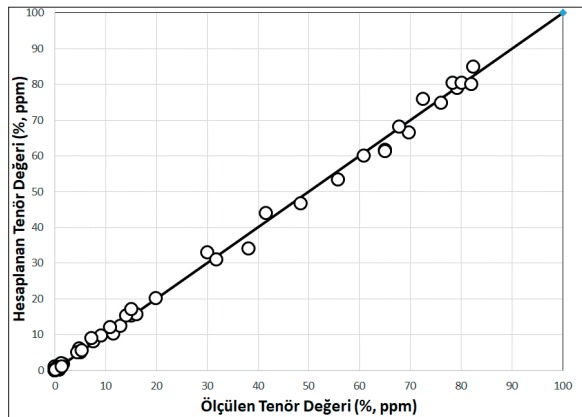
Hem tesis çalışmaları sırasında alınan numunelerin hem de laboratuvar çalışmaları sırasında alınan numunelerin ölçülen tenör değerleri ile madde denkliği sonucu hesaplanan tenör değerleri 'y=x' eğrisi üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 6).

Şekil 6'da ölçülen ve hesaplanan tenör değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum hem numune alma işlemlerinin hem de kimyasal analiz işlemlerinin başarılı şekilde gerçekleştirildiğini göstermektedir.

Çizelge 6. Sallantılı masa testi hesaplanan tenör verim değerleri

Sallantılı Masa Testi Tenör Değerleri						
Ürün	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (ppm)	SiO ₂ (%)	S (%)
Besleme	100,0	1,04	0,07	0,79	64,99	15,15
Konsantre	11,63	4,80	0,40	4,39	1,43	48,46
Ara Ürün	18,12	1,24	0,07	0,78	38,12	31,79
Atık	70,25	0,37	0,02	0,20	82,44	5,34

Sallantılı Masa Testi Verim Değerleri						
Ürün	Ağırlık (%)	Cu (%)	Zn (%)	Au (%)	SiO ₂ (%)	S (%)
Besleme	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Konsantre	11,63	53,68	61,82	64,42	0,26	37,20
Ara Ürün	18,12	21,63	17,02	17,88	10,63	38,01
Atık	70,25	24,68	21,16	17,71	89,12	24,78



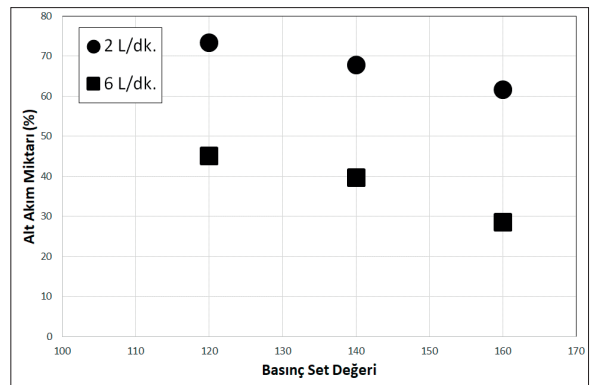
Şekil 6. Ölçülen-hesaplanan tenör değerleri

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. KYA Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

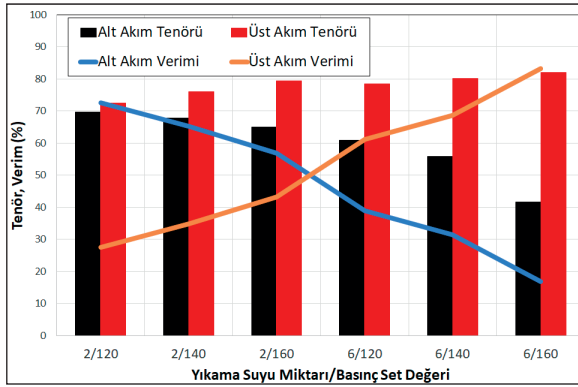
Bu bölümde KYA testlerinden elde edilen sonuçlar detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin alt akım miktarına olan etkisi Şekil 7'de verilmektedir. Şekil 7'den açıkça görüldüğü üzere, yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artması KYA alt akımına giden malzeme miktarını azaltmaktadır. KYA alt akımına giden malzeme miktarı yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artması sonucu %73,32'den %28,57 değerine kadar düşmektedir. Şekil 7 incelendiğinde alt akıma giden miktarın birincil olarak yıkama suyu miktarına bağlı olduğu, basınç set değerinin etkisinin ise daha düşük olduğu görülmektedir.

Tanelerin aşağı yönlü çökme hızına ters yöndeki yukarı yönlü su hızı, yıkama suyu miktarının ve kolon kesit alanının bir fonksiyonudur. Ayrım bölgesine giren tanelerin çökme hızları yukarı yönlü su hızından düşük olduğu takdirde taneler üst akıma taşınmaktadır. Bu nedenle yıkama suyu miktarının artırılması sonucu aynı yatak basıncı değerinde daha fazla tane üst akıma gitmekte ve bu nedenle alt akım miktarı da düşmektedir. Literatürde sabit yoğunluklu numunelerle yapılan benzer çalışmalar yıkama suyu miktarının alt akım miktarı üzerinde birincil derecede etkiye sahip olduğunu göstermektedir (Ozcan ve Ergun, 2017b).



Şekil 7. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin alt akım miktarına olan etkisi

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin SiO₂ tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 8'de verilmektedir.



Şekil 8. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin SiO₂ tenör-verim değerlerine etkisi

Şekil 8 incelendiğinde yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artması ile birlikte KYA alt akım SiO₂ tenörü ve veriminin önemli ölçüde düştüğü, üst akım SiO₂ tenörünün kısıtlı oranda, veriminin ise önemli ölçüde arttığı gözlenmektedir. Test 6 sonuçları incelendiğinde beslemedeki kuvarsin yaklaşık olarak %83'ünün KYA üst akımından alındığı görülmektedir. Bu sonuç siklon beslemesi içerisindeki kuvars tanelerinin çok verimli bir şekilde KYA üst akımdan alınabildiğini göstermektedir. Kuvars tenör ve verim değerlerinin alt akımda artış, üst akımda ise azalış göstermesi yıkama suyu miktarı ve basınç set değerindeki artışın ekipman içerisindeki kuvars tanelerini seçimli olarak üst akıma taşıdığı anlamına gelmektedir.

KYA içerisindeki taneler engelli çökme koşulları altında çökmemektedir. Ekipman içerisindeki ayırım bölgesinde tanelerin özgül ağırlık farkına göre ayrılmasını sağlayan bir ağır ortam kendiliğinden oluşmaktadır. Bu ağır ortam ekipman içerisindeki yoğunluk ve viskozitenin artmasına neden olmakla birlikte tanelerin aşağı yönlü hareketine karşı olan sürtünme kuvvetlerini de arttırmaktadır. Sonuç olarak değişen akışkan özelliği, engelli çökme koşullarının varlığı ve yukarı yönlü su hızı tanelerin hangi yönde hareket edeceğini belirlemektedir. Literatürdeki birçok çalışma tanelerin yukarı yönlü su hızına bağlı olarak KYA içerisindeki çökme hızı şeklinde tanımlanan kayma hızı kavramı üzerinde durmaktadır (Richardson ve Zaki, 1954).

Galvin ve arkadaşları engelli çökme ayırıcıları konusunda çalışmalar yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda pülp yoğunluğu ile çökme hızını ilişkilendirmişlerdir. Bu durum kayma hızının hidrodinamik kuvvetlere ne şekilde bağlı olduğunu açıklamaktadır. Galvin'e göre tanelerin pülp içerisindeki hacimsel oranının artması kayma hızını düşürmektedir. Bu açıklamadan yola çıkılarak Richardson ve Zaki eşitliği güncellenerek bir kayma hızı eşitliği geliştirilmiştir (Eşitlik 1), (Galvin vd., 1999).

$$V_{ti} = U_{ti} \left(\frac{\rho_i - \rho_p}{\rho_i - \rho_f} \right)^{n_i - 1} \quad (1)$$

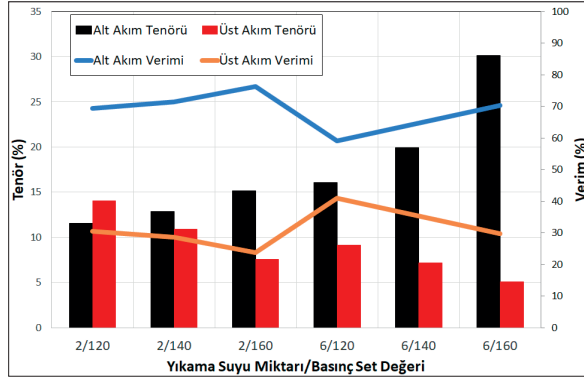
Burada,

- V_{ti} : Kayma hızı,
- U_{ti} : Terminal çökme hızı,
- ρ_i : Tane yoğunluğu,
- ρ_p : Pülp yoğunluğu,
- ρ_f : Sıvı yoğunluğu
- n_i : Richardson ve Zaki indeksi

şeklinde verilmektedir.

Eşitlik 1 üzerinde yapılan detaylı araştırmalar tanelerin terminal çökme hızlarının boyut ve yoğunluklarına başka bir deyişle kütlelerine bağlı olduğunu göstermiştir (Sarkar vd., 2008b). Sonuç olarak ayırım bölgesi içerisinde yer alan ve yeterli kütleyle sahip taneler sürtünme kuvvetlerini yenilemekte ve malzeme yatağından geçerek alt akıma gelebilmektedirler. Aksi takdirde ise üst akıma taşınmaktadırlar. Gerçekleştirilen testlerde daha hafif olan kuvars tanelerinin malzeme yatağı içerisindeki sürtünme kuvvetlerini yenememesi sonucu yukarı yönlü hareket eden yıkama suyu ile birlikte üst akıma taşındıkları düşünülmektedir. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artmasına rağmen alt akımdaki kuvars tenörü ve veriminin düşmesi de beslemenin büyük oranda kuvarstan oluşması ve KYA içerisindeki engelli çökme koşulları ve yukarı yönlü su hızından seçimli şekilde etkilenmeleri ile açıklanabilir.

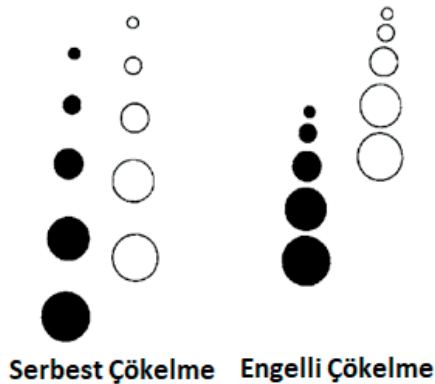
Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin sülfür tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin sülfür tenör-verim değerlerine etkisi

Şekil 9 incelendiğinde yıkama suyu miktarı ve basınç set değerindeki artış altakım sülfür tenörünü %11,59'dan %30,10'a kadar yükseltmekte, üst akım sülfür tenörünü ise %14,03'ten %5,10 değerine kadar düşürmektedir. Düşük ve yüksek yıkama suyu miktarlarındaki sülfür tenör-verim ilişkileri ise Şekil 8'de verilen kuvars tenör verim ilişkisinden farklılık göstermektedir.

Sabit yıkama suyu miktarında basınç set değerinin artması alt akım sülfür verimini artırırken üst akım sülfür verimini düşürmektedir. Basınç set değerinin artmasıyla ekipman içerisinde baskın hale gelen engelli çökeltme koşulları sonucunda sülfür içeren pirit gibi minerallerin yoğunluklarına bağlı olarak malzeme yatağının alt kısımlarına ilerledikleri düşünülmektedir. Elde edilen bu sonuç farklı yoğunluk ve boyut değerlerine sahip tanelerin serbest ve engelli çökeltme koşulları altındaki davranımı ile örtüşmektedir (Şekil 10).

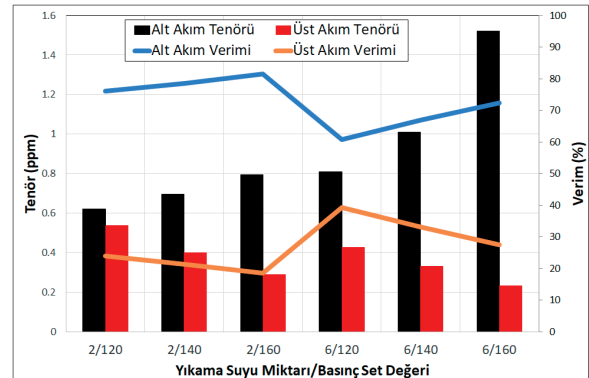


Şekil 10. Tanelerin serbest ve engelli çökeltme koşulları altındaki davranımları (Wills ve Napier-Munn, 2006)

Şekil 10 incelendiğinde engelli çökeltme koşulları altında yoğunluğu yüksek ve iri taneler ile yoğunluğu yüksek ve ince taneler hafif tanelere göre daha hızlı hareket etmekte ve malzeme yatağı içerisinde daha alt bir noktada yer almaktadırlar. Sabit yıkama suyu miktarında basınç set değerinin artmasıyla bu hareketin daha belirgin hale geldiği, kuvars tanelerinin yatağın üst kısmına itilmesine karşın sülfür içeren pirit gibi minerallerin daha verimli şekilde alt akıma gelerek sülfür tenör ve verimini arttırdığı düşünülmektedir.

Ancak yıkama suyu miktarının 2 L/dk'dan 6 L/dk'ya çıkarıldığı ve basınç set değerinin en düşük değere çekildiği Test 4 (6/120) sonuçları incelendiğinde alt akım sülfür veriminin ani bir düşüş, üst akım sülfür tenörü ve veriminin ani bir yükseliş yaşadığı görülmektedir. Yıkama suyu miktarının artırılması aynı zamanda yukarı yönlü hidrolik taşıma kuvvetinin de artırılması anlamına gelmektedir. Bu durum kuvars tanelerinin yanında daha ince boyda olan yoğunluğu yüksek tanelerin de malzeme yatağının üst kısımlarına taşınmasına neden olmaktadır. Ayrıca basınç set değerinin düşürülmesi ekipman içerisindeki engelli çökeltme koşullarının daha az baskın hale gelmesine neden olmaktadır (Şekil 10). Yoğunluğu yüksek ancak kayma hızı nispeten düşük tanelerin bu yüksek su hızı ile üst akıma taşındığı düşünülmektedir. 6 L/dk. yıkama suyu miktarında basınç set değerinin artırılması her ne kadar alt akım sülfür verimini arttırsa da verim değerleri 2 L/dk. yıkama suyu miktarına göre düşük kalmaktadır. Bu sonuç alt akımdan yüksek tenör ve verim alınması için birbirine zıt koşullarda çalışılması gerektiğini göstermektedir.

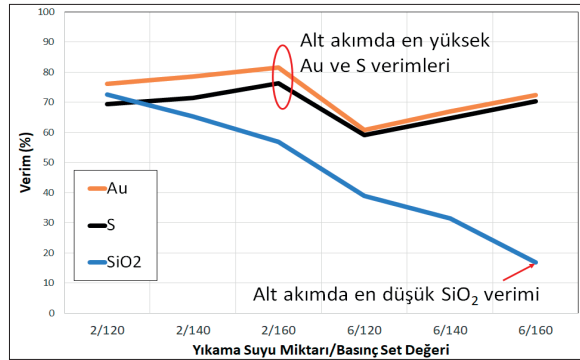
Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin altın tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 11'de verilmektedir.



Şekil 11. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin altın tenör-verim değerlerine etkisi

Şekil incelendiğinde yıkama suyu miktarı ve basınç set değerindeki artış alt akım altın tenörünü 0,66 ppm'den 1,52 ppm'e kadar yükseltmekte, üst akım tenörünü ise 0,54 ppm'den 0,23 ppm'e kadar düşürmektedir. Yıkama suyu miktarının artışı aynı basınç set değerinde alt akım altın verimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Sonuçlar bu açıdan incelendiğinde, altın ve sülfür arasındaki tenör-verim ilişkisinin çok benzer olduğu görülmektedir. Tüvenan cevhere yapılan mineralojik analiz sonuçları da cevher içerisinde bulunan altının çoğunlukla pirit kafesinde olduğunu göstermiştir. Bu nedenle üst akımdan kuvarsın verimli şekilde alındığı koşullarda alt akımda sülfür ve altın verimlerinin düştüğü düşünülmektedir.

Şekil 12 incelendiğinde alt akım altın ve sülfür verimleri benzer davranım göstermektedir. Ancak altın veriminin sülfür veriminden bir miktar daha fazla olması cevher içerisinde serbest altın varlığının işaretçisi olabilir. Ancak bu çalışma kapsamında serbest altın varlığının belirlenmesine yönelik herhangi bir çalışma yürütülmemiştir.

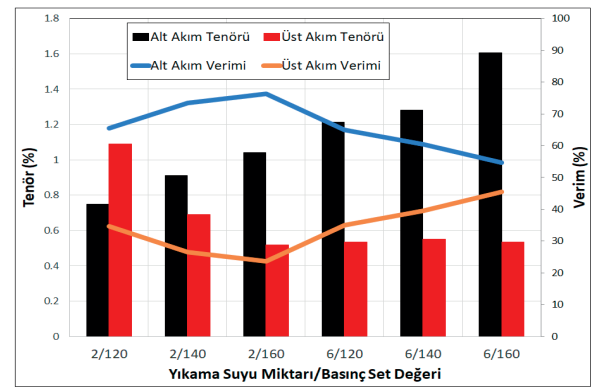


Şekil 12. Alt akım Au, S ve SiO₂ verimlerinin karşılaştırılması

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin bakır tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 13'te verilmektedir.

Şekil 13 incelendiğinde düşük yıkama suyu miktarında basınç set değerinin artması alt akım bakır tenör ve verimini arttırmaktadır. Ancak yıkama suyu miktarındaki artış sülfür ve altın değerlerine benzer şekilde alt akım bakır verimini önemli ölçüde düşürmektedir. Yüksek yıkama suyu miktarındaki bakır verimi ele alındığında, basınç set değerinin artması alt akım bakır verimini önemli

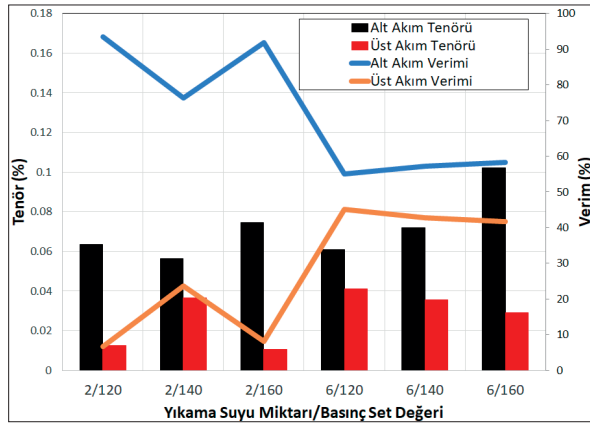
ölçüde düşürmektedir. Bu durum engelli çökeltme koşullarının daha baskın hale gelmesine karşın bakır içeren tanelerin üst akıma gitmesi anlamına gelmektedir. Literatürde aynı cevher ile yapılan bir çalışmada tüvenan cevher -9 mm'ye kırılarak fraksiyonel bakır analizine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre tane boyu fraksiyonunun incilmesi bakır tenörünü arttırmaktadır. Bu durum cevher içerisindeki kalkopirit mineralinin pirit mineraline göre daha kırılabilir oluşu ile açıklanmıştır. Sonuç olarak ise kalkopirit mineralinin öğütülmesi için daha düşük bir enerji seviyesinin yeterli olacağı bildirilmiştir (Gül ve Önal, 2000).



Şekil 13. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin Cu tenör-verim değerlerine etkisi

Bu sonuçlar karşılaştırıldığında çakıl değirmenden çıkan kalkopirit mineralinin pirit mineraline göre çok daha ince boyda olduğu söylenebilir. Ayrıca çakıl değirmen çıkışı spiral sınıflandırıcı da sınıflandırılmakta ve spiral sınıflandırıcı incesi siklon beslemesi olarak kullanılmaktadır. KYA ile gerçekleştirilen testlerde yüksek yıkama suyu miktarında daha ince boylarda olduğu düşünülen kalkopirit mineralinin daha çok miktarda üst akıma taşındığı ve alt akım bakır veriminin düştüğü düşünülmektedir. Yüksek yıkama suyu miktarında basınç set değerinin artırılması üst akım bakır verimini düşürmemiştir. Bu durum ise daha viskoz hale gelen malzeme yatağı içerisinde kalkopirit tanelerinin yatağın üst kısımlarında kaldığı ve ince boyda olmaları sonucu yeterli kütleye sahip olamadıkları için yıkama suyu ile birlikte üst akıma taşındığı şeklinde yorumlanabilir.

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin çinko tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 14'te verilmektedir.



Şekil 14. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin Zn tenör-verim değerlerine etkisi

Şekil 14 incelendiğinde yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin alt akım çinko tenörünü %0,06'dan %0,10 değerine kadar yükselttiği görülmektedir. Ancak elde edilen sonuçlar, KYA işlem değişkenlerinin alt akım çinko verimi üzerinde anlamlı bir etki yaratmadığını göstermektedir. Özellikle yıkama suyu miktarının artması üst akım çinko verimini önemli ölçüde arttırırken basınç set değerinin artması çinko veriminde gözle görülür bir iyileşme sağlamamıştır.

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin çinko tenör-verim değerleri üzerine olan etkisi Şekil 14'te verilmektedir.

KYA testlerinden elde edilen sonuçlar farklı yoğunluklara sahip minerallerin engelli çökelme koşulları altındaki davranımını ortaya koyma konusunda önemli katkı sağlamıştır. Tanelerin bu koşullar altındaki davranımları başta yoğunlukları, tane boyları, serbestleşme dereceleri ve şekilleri gibi birçok değişken tarafından kontrol edilmektedir. Değirmenden çıkan tanelerin nispeten serbestleşme boyutuna kadar öğütüldüğü ve benzer şekillerde olduğu düşünülürse çalışmadan elde edilen sonuçlar, minerallerin KYA ile yoğunluk farkına göre ayrılabilceğini göstermektedir. Ancak yıkama suyu miktarındaki artış sonucunda yoğunluğu yüksek ancak çok ince boyda olan tanelerin KYA üst akımından kaybedildiği gözlenmiştir. Bu durumda ise KYA beslemesinin daha dar tane boyu dağılımı içerecek şekilde sınıflandırılması ve boyut etkisinin en aza indirilmesinin ekipman verimini arttıracığı düşünülmektedir. Literatür çalışmalarında da

dar tane boyu aralığında gerçekleştirilen KYA ile zenginleştirme testlerinin daha verimli olduğu bildirilmiştir. (Ozcan ve Celik, 2016).

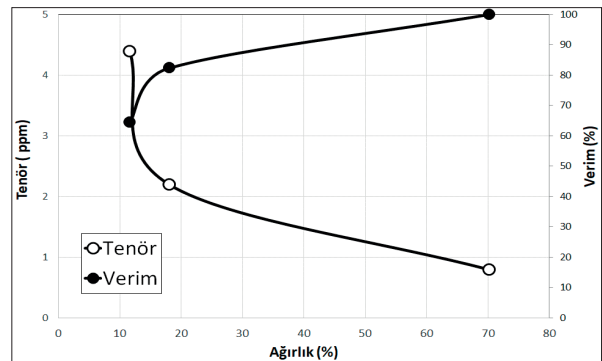
5.2. Sallantılı Masa Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

KYA ile gerçekleştirilen testlere ait sonuçlar incelendiğinde silisin cevherden başarılı şekilde uzaklaştırıldığı anlaşılmaktadır. Ancak bu koşulda alt akımdaki metal verimleri önemli ölçüde düşüş göstermektedir.

Sallantılı masa testinde 3 no'lu KYA testi alt akım numunesi kullanılmıştır. Çizelge 5 incelendiğinde bu koşuldaki alt akım altın ve sülfür verimlerinin en yüksek değerlerinde olduğu görülmektedir. KYA alt akım numunesi ile gerçekleştirilen sallantılı masa testine ait birikimli tenör-verim değerleri Şekil 15'te verilmektedir.

Şekil 15 incelendiğinde sallantılı masa beslemesinin ağırlıkça %11,63'ü 4,39 ppm altın tenörü ve %64,42 altın verimi ile nihai konsantre olarak elde edilebilmektedir. Bu koşuldaki konsantre %48,46 gibi yüksek bir sülfür tenörüne de sahiptir. Ara ürünün de konsantreye dahil edilmesi durumunda ağırlıkça %29,95'lik bir başka konsantre %2,19 Altın tenörü ve %82,29 Au verimi ile elde edilebilmektedir. Bu koşuldaki konsantrenin sülfür tenörü ise % 38,31 olmaktadır.

Sallantılı masa test sonuçları ve altın tenör-verim değerleri incelendiğinde cevher içerisinde bulunan altının yüksek bir verim değeri ile kazanılabildiği görülmektedir. Sallantılı masa testi sırasında masa üzerindeki ürün bantlarını gösterir görüntü de ayırmanın oldukça başarılı olduğunun bir göstergesidir (Fotoğraf 1).



Şekil 15. Sallantılı masa birikimli altın tenör-verim değerleri

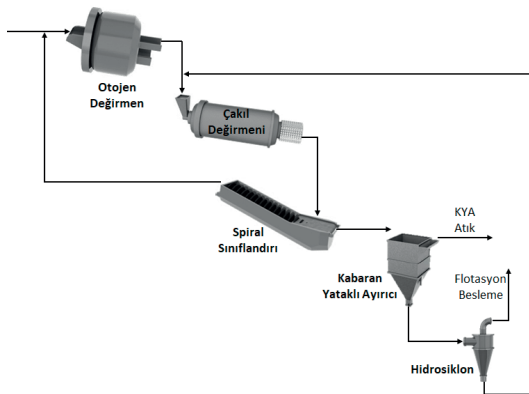


Fotoğraf 1. Sallantılı masa testine ait görüntü

5.3. Akım Şeması Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

KYA ve sallantılı masa ile yürütülen deneysel çalışmalar iki farklı sonuç ortaya koymuştur. Bunlardan ilki, siklon beslemesinin yaklaşık %70'ini oluşturan silisin yüksek yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinde yüksek verim ile cevherden uzaklaştırılabilmesidir. İkincisi ise daha düşük yıkama suyu miktarı ve yüksek basınç set değerinde siklon beslemesinde yer alan altın ve sülfürün yüksek verim değerleri ile KYA alt akımından alınmasıdır (Çizelge 5).

Elde edilen ilk koşulun tesis ölçekli uygulandığı varsayılarak oluşturulan basitleştirilmiş akım şeması Şekil 16'da verilmektedir.

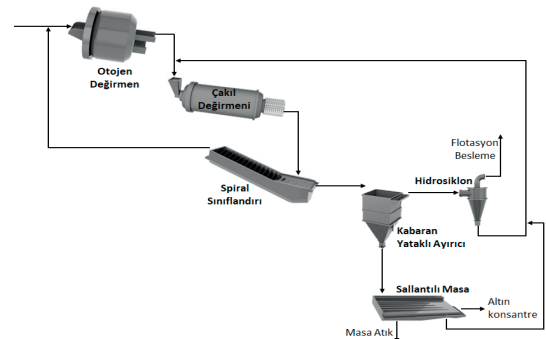


Şekil 16. Alternatif akım şeması 1

Şekil 16'da verilen akım şeması incelendiğinde spirale sınıflandırıcı taşanının KYA'ya beslendiği, KYA üst akımının flotasyon devresine beslenmeden atıldığı, KYA alt akımının ise siklon beslemesi olduğu görülmektedir. Bu akım şemasının normal akım şemasından en büyük farkı KYA'nın bir ön zenginleştirme ekipmanı

olarak kullanılmasıdır. Bu koşulda siklon beslemesi normal çalışma koşullarına göre daha iri ve daha yüksek tenörlü olacaktır. Bu durumda ise yüksek yoğunluklu tanelerin aşırı öğütülme sorunu devam edecektir.

Tesiste yer alan siklon etrafında ve laboratuvar ölçekli KYA etrafında yapılan madde denkleği çalışmalarında siklon beslemesi 299,94 t/s tonaj ve %70,47 kuvars tenörüne sahiptir. Spirale sınıflandırıcı taşanının uygun boyutlu tesis ölçekli bir KYA'ya beslenmesi durumunda, 214,24 t/s, % 82,04 kuvars tenörlü bir ön atığın %83,15 verimle atılabileceği ön görülmektedir. Bu değerler siklon üzerindeki besleme ve geri dönüş tonajlarının önemli ölçüde düşmesi anlamına da gelmektedir. Ancak bu akım şemasında önemli dezavantajlar da bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi KYA beslemesi içerisindeki metallerin işletme koşulları nedeniyle önemli ölçüde KYA üst akımından atık olarak atılmasıdır. Siklon beslemesinde yer alan bakır ve çinkonun yaklaşık olarak %40'ı, altın ve sülfürün ise yaklaşık olarak %30'u KYA üst akımından kaybedilmektedir. Bir diğer önemli dezavantaj ise KYA-siklon grubunun çalışma prensiplerindeki farktan kaynaklanmaktadır. KYA işletme değişkenleri değiştirilerek kolayca farklı koşullarda çalıştırılabilecek bir ekipmandır. Siklonlar ise besleme özelliklerinin değişmesi durumunda daha düşük verim değerlerinde çalışmaktadırlar. Siklonlarla ilgili bir başka problem ise yüksek yoğunluklu tanelerin siklon alt akımında birikmeleri ve aşırı öğünmeye maruz kalmalarıdır. Bu taneler her ne kadar tekrar KYA alt akımına gelme eğiliminde olsalar da çok ince boylara öğütülen taneler zaman içerisinde KYA üst akımının metal kaybını artırabilir. Elde edilen ikinci koşul için oluşturulan basitleştirilmiş akım şeması Şekil 17'de verilmektedir.



Şekil 17. Alternatif akım şeması 2

Şekil 17'de verilen ikinci akım şeması incelendiğinde spiral sınıflandırıcı taşanının KYA'ya beslendiği, KYA alt akımından alınan bir ön konsantrenin sallantılı masa devresi ile nihai zenginleştirme işlemine tabi tutulduğu, KYA üst akımının ise siklona beslendiği görülmektedir. Ayrıca masa devresi ara ürünü yüksek metal içeriği nedeniyle yeniden öğütme devresine döndürülmektedir. Bu akım şemasında KYA alt akımından alınan ürünün sallantılı masa ile nihai zenginleştirmeye tabi tutulması sonucunda ise, 4,39 ppm altın ve %48 sülfür tenörlü ve ağırlıkça düşük bir konsantre elde edilebilmektedir. Bu koşulda elde edilen KYA üst akımı ise siklona beslenebilir özelliğindedir. İkinci akım şeması alternatifinde yer çekimi ile zenginleştirme yöntemi kullanılarak flotasyon devresine göre nispeten daha iri bir boyda altın konsantresi elde edilmektedir. Sallantılı masa devresinden alınan ara ürünün tekrar öğütmeye tabi tutulması ise serbestleşme problemi olan taneler açısından olumludur. Siklon beslemesinde yer alan yüksek yoğunluklu tanelerin aşırı öğütülme olasılığının bu sayede düşürülebileceği düşünülmektedir. Madde denkliliği çalışmalarından elde edilen sonuçlar, bu koşulda 299,94 t/s, 0,60 ppm altın ve %70,47 kuvars tenörlü spiral sınıflandırıcı taşanının uygun boyutlarda tesis ölçekli bir KYA'ya beslenmesi, 184,95 t/s, 0,79 ppm altın, %15,15 sülfür ve %64,99 kuvars tenörlü bir ön konsantre alınabileceğini göstermektedir. Bu ön konsantre uygun bir masa devresinde nihai zenginleştirmeye tabi tutulursa 21,51 t/s, 4,39 ppm altın, %48,46 sülfür ve 1,43 kuvars tenörlü bir konsantre elde edilebilmektedir. Siklon beslemesine göre nihai konsantre verimleri ise altın, sülfür ve kuvars için sırasıyla %52,50, %28,39 ve %0,15 şeklindedir.

YORUM VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında Murgul Çakmakaya bakır cevheri öğütme devresinde yer alan siklon beslemesinden temsili numuneler toplanmış ve laboratuvar ölçekli bir KYA ile ön zenginleştirme çalışmaları yürütülmüştür. Laboratuvar ölçekli KYA testlerinden elde edilen sonuçlara göre, yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artması KYA alt akımına giden malzeme miktarını azaltmaktadır.

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin kuvars tenör-verim değerlerine etkisi incelendiğinde, yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin artması ile birlikte KYA alt akımı kuvars tenörü ve veriminin önemli ölçüde düştüğü, üst akım kuvars tenörünün kısıtlı oranda, veriminin ise önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Üst akım tenöründeki kısıtlı değişimin başlıca nedeni test çalışmalarında kullanılan cevherin %70'inin kuvars olması şeklinde yorumlanmaktadır.

Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin sülfür tenör-verim değerlerine etkisi incelendiğinde, basınç set değerinin artması sonucu alt akım tenör ve verim değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Ancak yıkama suyu miktarındaki artış alt akım sülfür veriminde önemli bir düşüşe yol açmıştır. Yıkama suyu miktarı ve basınç set değerinin altın tenör-verim değerlerine etkisi incelendiğinde sülfür değerlerine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kuvarsın cevherden yüksek verim değerlerinde uzaklaştırıldığı koşulda üst akım altın ve sülfür verimleri de önemli ölçüde artmaktadır. Bu durumda tesisin hangi ürüne yönelik çalışacağına kararlaştırılması ve KYA işletme değişkenlerinin o koşula göre ayarlanması gerektiği düşünülmektedir.

Çalışmanın temel amacına uygun olarak 3 no'lu KYA testi alt akım numunesi nihai zenginleştirme testinde kullanılmıştır. Bu koşulda altın ve kükürt verimleri KYA alt akımında en yüksek değerlere erişmektedir. Sallantılı masa testi sonuçları incelendiğinde masa beslemesinin ağırlıkça %11,63'ü 4,39 ppm altın tenörü ve %64,42 altın verimi ile nihai konsantre olarak elde edilebilmektedir. Bu koşuldaki konsantre %48,46 gibi yüksek bir S tenörüne de sahiptir.

KYA testleri sonucunda farklı yoğunluklara sahip minerallerin engelli çökme koşulları altındaki davranımının ortaya konması konusunda önemli veriler elde edilmiştir. KYA ve sallantılı masa testlerinden elde edilen sonuçlar kullanılarak iki farklı akım şeması alternatifi geliştirilmiş, devre üzerinde yaratması muhtemel etkileri yorumlanmıştır. Sonuç olarak tenör-verim ilişkileri incelendiğinde iki numaralı akım şeması alternatifinin daha olası olduğu düşünülmektedir. Bu akım şemasında KYA ile bir ön zenginleştirme gerçekleştirilmektedir. KYA ön konsantresi

sallantılı masa devresi ile nihai zenginleştirmeye tabi tutulmaktadır. KYA üst akımı ise birinci alternatiften farklı olmak üzere atık olarak atılmamakta öncelikle siklon ile sınıflandırılmakta ardından flotasyon devresine beslenmektedir. Ayrıca nihai atık tenörünün düşürülmesi açısından sallantılı masa devresinden alınan ara ürünün tekrar sisteme döndürülmesi önerilmektedir.

Mineraller arasındaki boyut ve yoğunluk farkına dayalı bir ön zenginleştirme işleminin hem nihai zenginleştirme işlemlerine girecek tenörü artırması hem de miktarı azaltması açısından önem arz ettiği düşünülmektedir. KYA'lar besleme koşullarından bağımsız olarak uygun endüstriyel boyutlarda çok farklı işletme koşullarında çalıştırılabilmektedir. Bu yönü ile KYA'ların siklonlardan daha verimli sınıflandırma ve zenginleştirme yaptığı bilinmektedir. Literatürde yapılan kısıtlı sayıdaki çalışmada da KYA'ların siklonlardan daha verimli ekipmanlar olduğu belirtilmektedir.

Elde edilen tesis ve laboratuvar ölçekli veriler kullanılarak farklı akım şeması alternatiflerini oluşturmak öğütme ve zenginleştirme devreleri için olumlu görünmektedir. Ancak laboratuvar ölçekli sonuçlardan endüstriyel boyutlu uygulamalara geçilirken (ölçek büyütme) teknik ve ekonomik açıdan daha fazla çalışma yapılmasının önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Erlar, A., 1993. Altın ve Türkiye. Metalurji Dergisi 87/27.

Galvin, K. P., Pratten, S. J. Nicol, S. K., 1999. Dense Medium Separation Using A Teetered Bed Separator. Miner. Eng., Vol. 12, no. 9, 1059-1081.

Gül, A., Önal, G., 2000. Pre-Concentration of A Low-Grade Sulfidic Copper Ore From Murgul Çakmakkaya Region of Turkey, Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress, eBook ISBN: 9780080543895, C10-1-C10-4.

Karabalık, N., 1994. Altının Türkiye'deki Yakın Geleceği. JMO Bülteni, Sayı 94/1, Ankara

Kawatra, S. K., Eisele, T. C., 2005. Optimization of Comminution Circuit Throughput and Product Size Distribution by Simulation and Control.

Final Technical Report, Department of Chemical Engineering Michigan Technological University, p. 64.

Kumar, C. R., Bhoja, S. K., Tripathy, S. K., Mohanan, S., Venugopalan, T., Suresh N., 2013. Classification Performance Evaluation of Floatex Density Separator For Coal Fines. Fuel, no. 108, 303-310.

Kumar, C. R., Tripathy, S. K., Rao, D. S., 2009. Characterisation and Pre-concentration of Chromite Values from Plant Tailings Using Floatex Density Separator. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 8, no. 5, 367-378.

Ozcan, O., Ergun, S. L., 2017a. Performance of Teetered Bed Separator For Non-Coal Applications, Separation Science and Technology. Vol. 52:8, 1486-1495.

Ozcan, O., Celik, I.B., 2016. Beneficiation Routes For Upgrading Iron Ore Tailings With A Teetered Bed Separator. Separation Science and Technology, Vol. 51:17, 2844-2855.

Özcan, Ö., 2017. Kabaran Yataklı Ayırıcı ile Farklı Minerallerin Zenginleştirilmesi. Yerbilimleri, Cilt 38 (2), 179-192.

Özcan, Ö., Ergün, Ş. L., 2017b. Yıkama Suyu Miktarının Kabaran Yataklı Ayırıcı Performansı Üzerine Etkisi. IMCET 2017 Bildiri Kitabı, ISBN: 978-605-01-1008-1611-619, Antalya.

Özcan, 2015. Kömür Dışı uygulamalarda Kabaran Yataklı Sınıflandırıcıların Performansının İncelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 168 s.

Richardson, J. F., Zaki, W. N., 1954. Sedimentation and Fluidization: Part I. Transact of Institution of Chemical Engineers, Vol. 32, 35-53.

Sarkar, B., Das, A., Roy S., Kai, K., 2008a. In Depth Analysis of Alumina Removal From Iron Ore Fines Using Teetered Bed Gravity Separator. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 117, no. 1, 48-55.

Sarkar, B., Das, A., Mehrotra, S. P., 2008b. Study of Separation Features in Floatex Density Separator For Cleaning Fine Coal. Int. J. Miner. Process., no. 86, 40-49.

Triphaty, S. K., Mallick M. K., Singh V., Murthy R. M., 2013. Preliminary Studies on Teeter Bed Separator For Separation of Manganese Fines. *Powder Technology*, no. 239, 284-289.

Ünal, İ.H., Tuncel, S., Yoleri, B., Arslan, M., 2016. *Türkiye ve Dünyada Altın*. MTA Genel Müdürlüğü,

Fizibilite Etütleri Dairesi Başkanlığı, Ankara, s. 35.

Wills, B. A., Napier-Munn, T., 2006. *Mineral Processing Technology, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral*, Publisher: Elsevier Science & Technology Books, ISBN: 0750644508.



Orijinal Araştırma / Original Research

SİVAS BÖLGESİNE AİT DEMİR CEVHERİNİ KURU MANYETİK AYIRMA İLE ZENGİNLEŞTİRME ÇALIŞMALARI VE UYGUN TESİS TASARIMI

ENRICHMENT STUDIES OF IRON ORE IN SİVAS REGION WITH DRY MAGNETIC SEPARATION AND PROPER PLANT DESIGN

Ergin Gülcan^{a,*}, Özcan Yıldırım Gülsoy^{a,**}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 06800, Beytepe, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 25 Ocak / January 2018
Kabul Tarihi / Accepted : 27 Şubat / February 2018

Anahtar Sözcükler:

Hematit,
Yüksek alan şiddetli kuru
manyetik ayırma,
Ağır ortam,
Tesis tasarımı.

Keywords:

Hematite,
High intensity dry magnetic
separation,
Dense medium,
Plant design.

ÖZ

Bu çalışmada, Demir Export A.Ş.'ye ait demir cevheri numunesinin konvansiyonel manyetik ayırma ile zenginleştirmesine yönelik stratejiler değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan demir cevheri %53,20-53,78 Fe içeriğine sahip olup, SiO₂ içeriği %10,5'in üzerinde ölçülmüştür. Al₂O₃ içeriği ise %2,3'ün, toplam alkali içeriği (K₂O+Na₂O) ise %0,6'nın üzerindedir. Bu özellikleri ile cevherin satışlara temel teşkil eden analiz değerleri, Fe içeriğini sorunsuz olarak sağlamaktadır. Fakat silis, alümina ve alkali içerikleri red sınırı olarak tanımlanan değere çok yakın ya da bir miktar üzerinde olmaktadır. Deneysel çalışmalar özellikle impürite içeriğinin çıkardığı bu sorunları gidermeye yönelik olarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut üretim yöntemi göz önüne alınarak geliştirilen yöntemin kuru bir ayırma yöntemi olması gerekliliği belirlenmiş ve bu nedenle kuru manyetik ayırma testleri planlanmış ve yürütülmüştür. Ayrıca cevherden üretilebilecek en kaliteli ürün özelliklerini ortaya koyabilmek amacıyla ağır sıvı testleri de uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda -30+10 mm ve -10 mm fraksiyonlarında sırasıyla ağırlıkça %68 (%61,26 Fe) ve %92 (%55,39 Fe) oranında ürünler alınabileceği belirlenmiştir.

ABSTRACT

In this study, strategies for enrichment of iron ore samples of Demir Export A.Ş. via conventional magnetic separation were evaluated. Fe% and SiO₂ % of the iron ore used in the study is measured as in between 53.20-53.78 and above 10.5, respectively. Also, Al₂O₃ content is 2.3% and total alkali content (K₂O + Na₂O) is over 0.6%. Fe content of the ore meet the basic market sales requirements. On the other hand, silica, alumina and alkali contents are close to or slightly above the value defined as rejection limit. Experimental studies have been carried out in order to overcome these problems, especially the impurity content. Considering the current production method, it has been determined that the developed method should be a dry separation method, and therefore dry magnetic separation tests were planned and carried out. In addition, heavy liquid tests have been applied to reveal the best quality products that can be produced from the ore. Experimental studies have shown that 68% (61.26% Fe) and 92% (55.39% Fe) of products can be obtained from size fractions of -30 + 10 mm and -10 mm, respectively.

* Sorumlu yazar: ergingulcan@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8861-8061>

** ogulsoy@hacettepe.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-7063-7432>

GİRİŞ

Demir cevheri bilinen anlamda madenciliğin başlangıcından bugüne endüstrinin temel hammaddesi konumundadır. Modern sanayi ve kimyasal endüstrisinin ihtiyaçları doğrultusunda bir yandan nihai üründe aranan safsızlıkların baz değerleri düşmekte, bir yandan da tenörü azalan rezervlerin daha verimli işlenmesi gerekliliği ön plana çıkmaktadır (Kuskov ve Nikitin, 2002; Rachappa ve Prakash, 2015). Doğada oksitli (hematit, manyetit, götit, limonit), karbonatlı (siderit) veya sülfürlü (pirit, pirotin, markazit) formlarda bulunabilen demir mineralleri, cevher yapısına bağlı olarak oldukça farklı özellikler gösterebilmektedir.

Temel olarak demir içeren mineralin manyetik alınganlığından faydalanılan demir cevheri zenginleştirme pratikleri; safsızlıkların mineralojik yapısına, serbestleşme boyuna, çelik vb endüstriler tarafından talep edilen ürün kalitesine ve manyetik alınganlığın derecesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir ve bu anlamda ortaya çıkan zorlukların giderilmesine yönelik çalışmaları zorunlu kılmaktadır (Tripathy vd., 2014; Zeng vd., 2015; Ezhov ve Shvaljov, 2015; Seifelnassr vd., 2013; Chen vd., 2012; Srivastava ve Kawatra, 2009; Tripathy vd., 2017). Yüksek tenörlü hematit veya manyetit cevherleri alt tane boyu sınırı 10 mm olmak kaydı ile doğrudan veya kırma işlemini takiben izabeye verilebilmektedir. Düşük tenörlü cevherlerin ise zenginleştirilmeye tabi tutulması gerekmektedir (yüksek veya düşük alan şiddetli manyetik ayırma, ağır ortam, elektrotatik ayırma, flotasyon vb.) (Wills ve Napier-Munn, 2005). Bu çalışma kapsamında değerlendirilen numuneler Sivas bölgesinde bulunan demir cevheri zenginleştirme tesisinden temin edilmiştir. Mevcut üretim kapsamında, zaman zaman -70+30, -30+10 ve -10 mm tane boyutlarında ocaktan gelen cevherin kalitesinde yaşanan değişimler sebebiyle sorunlar yaşanmaktadır. İri boyda serbestleşme, ince boyda ise silis ve alkali safsızlıkların artışı ile ortaya çıkan bu sorunların çözümü amacıyla, çoğunlukla hematit olarak tanımlanan cevherin sorunlu durumlarda zenginleştirilebileceği alternatif bir manyetik ayırma tesisi tasarlanması değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda cevherin zenginleştirilebilirliğinin ortaya konulması amacıyla kademeli manyetik ayırma ve ağır sıvı testleri gerçekleştirilmiştir (Napier-Munn, 1991).

1. MALZEME VE YÖNTEM

1.1. Numune Hazırlama ve Karakterizasyonu

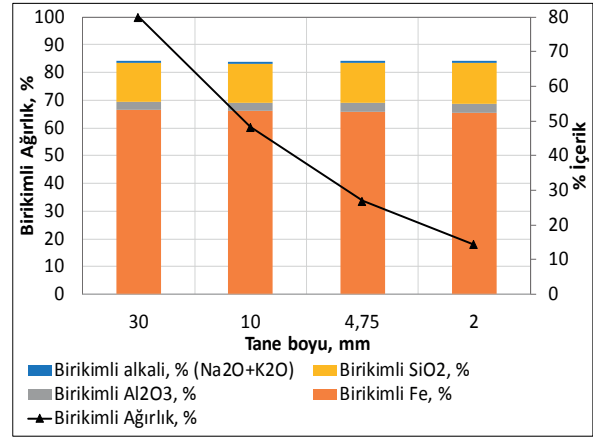
Deneysel çalışmalar kapsamında sahadan yaklaşık 500 kg numune temin edilmiştir. Numune yığını harmanlandıktan sonra iki temsili yığına bölünmüştür. Numune gruplarından birisi şahit olarak ayrılmış, diğeri de testlerde kullanılmak üzere satılabilir standartlara uygun olacak şekilde 30 mm'nin altına kırılmıştır. Çeneli kırıcı kullanılarak ve kontrollü olarak gerçekleştirilen kırma işlemini takiben karakterizasyon çalışmaları, manyetik ayırma ve ağır sıvı testlerinde kullanılmak üzere orijinal numune harmanlanarak temsili alt numuneler alınmıştır. Bu temsili numunelerden birisiyle elek analizi gerçekleştirilmiş ve zenginleştirme çalışmalarında da kullanılacak farklı tane boyutu fraksiyonlarının içerikleri belirlenmiştir. Diğer temsili numuneler ise deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere ayrılmıştır. Tane boyutu fraksiyonlarının ve besleme numunesinin genel bileşimleri ve ağırlıkları Çizelge 1'de verilmiştir. Elementel kompozisyonu belirlemede X-ışınları Floresans (XRF) spektroskopisi yöntemi kullanılmıştır. Ek olarak karşılaştırma amacıyla % Fe içerikleri eritiş yöntemiyle tekrar tayin edilmiştir. Şekil 1'de ise birikimli içeriklerin tane boyutu fraksiyonlarına göre dağılımı verilmektedir. Son olarak besleme numunesinin XRD desenleri incelenmiş ve tespit edilen baskın içerikler Şekil 2'de özetlenmiştir.

Çalışmalarda kullanılan cevherinin demir içeriği %53-54 seviyesindedir. Al_2O_3 içeriğinin ise %2,3-2,4 düzeyinde olduğu görülmektedir. Alkali içerikleri açısından Na_2O içeriği son derece düşük olup K_2O içeriği ise %0,63 seviyesindedir. SiO_2 içeriği ise yaklaşık %10 ölçülmüştür. XRD desenlerinde silikatların çoğunlukla olivin ve kuvars yapısında olduğu görülmektedir. Şekil 1'de de görülen bir diğer önemli husus ise demir ve diğer safsızlıkların tüm tane boyutlarına benzer miktarlarda dağılmış olmasıdır. Bu sebeple cevherin -2 mm fraksiyonunda bir miktar safsızlık artışı olmakla birlikte bu fraksiyonun demir içeriği de oldukça yüksektir. Cevherin safsızlık içeriğini düşürmek için ince tane boyutu fraksiyonunun elenerek ayrılması genel bir çözüm olarak görülmemektedir. Cevher çoğunlukla hematit mineralinden oluşmaktadır. XRD sonuçlarında yer yer manyetit desenlerine

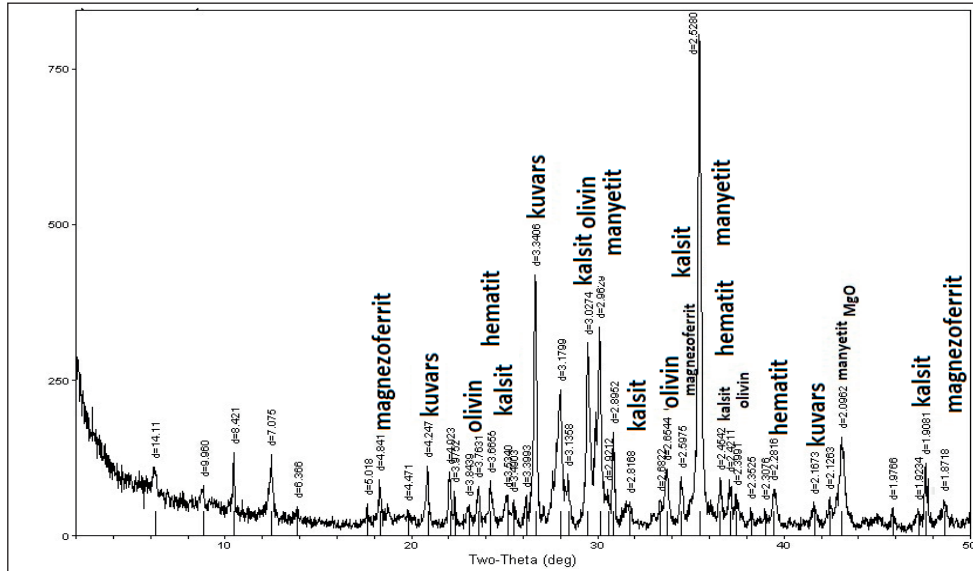
rastlansa da, yapılan öncül testlerde cevherin düşük alan şiddetli manyetik ayırma herhangi bir tepki vermediği gözlemlenmiştir.

Çizelge 1. Tane boyutu fraksiyonlarının genel bileşimleri

%	-30+10 mm	-10+4,75 mm	-4,75+2 mm	-2 mm	Besleme
Ağırlık	39,74	26,59	15,66	18,01	100
Fe	53,72	53,08	53,03	52,41	53,2
CaO	0,84	0,73	0,86	0,83	0,81
Al ₂ O ₃	2,24	2,34	2,57	2,5	2,37
K ₂ O	0,65	0,66	0,65	0,52	0,63
MgO	0,42	0,45	0,48	0,48	0,45
Na ₂ O	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02
P	0,13	0,13	0,15	0,15	0,14
S	0,14	0,13	0,14	0	0,11
SiO ₂	10,81	10,75	11,35	11,85	11,07



Şekil 1. Kritik içeriklerin tane boyutu fraksiyonlarındaki birikimli miktarları



Şekil 2. Besleme numunesi XRD analizi sonuçları

1.2. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalar kapsamında Demir Export A.Ş.'ye ait demir cevheri numunesinin manyetik ayırma ile zenginleştirilebilirliği değerlendirilmiştir. Cevher genel itibarıyla hematit cevheri olarak tanımlanmıştır ve bir miktar manyetit içerdiği bilinmektedir. Bu sebeple demir cevheri öncelikle düşük alan şiddetli kuru manyetik ayırıcıda sırasıyla 500, 900 ve 1300 gauss alan şiddetlerinde ayırma tabi tutulmuştur. Test edilen alan şiddetlerinin hiçbirinde manyetik ayırıcı tarafından herhangi bir ürün yakalanamamıştır.

Cevherin genel bileşimini hematit mineralinin oluşturması ve saçınımlı yüzey-doku özellikleri sebebiyle düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıda ayırma mümkün olmamıştır. Bu nedenle hazırlanmış olan numuneler yüksek alan şiddetli permollü tipi kuru manyetik ayırıcıda manyetik ayırma testlerine tabi tutulmuştur. Deneylerde kullanılan manyetik ayırıcı, birisi mıknatıs olmak üzere aralarındaki mesafe 15 cm ve çapları 10 cm olan iki adet rulo ile bunları birbirine bağlayan kevlar yüzeyden oluşmaktadır. Manyetik ayırma testlerinde cevher; yüzeyde yaklaşık olarak 6000

gauss alan şiddetine sahip rulo tipi kuru manyetik ayırıcıya öncelikle yüksek rulo hızında beslenmiş ve manyetik bir ürün ayrılmıştır. Daha sonra manyetik olmayan ürüne giden kısım (atık), daha düşük rulo hızında yine aynı ekipmana beslenerek yeni bir manyetik ürün elde edilmiştir. Bu işlem rulonun endüstriyel olarak çalıştırılabileceği hız limitlerine kadar düşürülerek devam etmiş ve her aşamada bir manyetik ürün alınmıştır. Cevhere uygulanan test yöntemi Şekil 3'de şematik olarak verilmektedir.

Manyetik ayırma testleri, serbestleşme de göz önüne alınarak, -30+10 mm ve -10 mm tane boyu fraksiyonlarına ek olarak cevherin tümü 10mm'nin altına kırıldıktan sonra ortaya çıkan -10mm fraksiyonuna da uygulanmış ve farklı manyetik ürünler ayrılmıştır. Yine tamamı 10mm'nin altına kırılmış cevher içinden -2 mm fraksiyonu elenerek ayrılmış ve benzer zenginleştirme testi -10+2mm fraksiyonuna da uygulanmıştır. Cevher yapısı tam olarak hematit veya manyetitten oluşmadığı için düşük alan şiddetli manyetik ayırıcıdan etkilenmeyen numunelerin yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcıda ayrıldığı görülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılan permoll tipi manyetik ayırıcıya -30+10 mm ve -10+4,75 mm tane boyutuna sahip malzemeler sırasıyla 200, 172, 132, 76 ve 32 devir/dakika hızla; içerisinde toz ve ince boyda taneler barındıran diğer tane boyutları ise sırasıyla 400, 350, 300, 230, 180 ve gerekmesi halinde 78 devir/dakika hızla beslenmişlerdir (Şekil 3). Yüksek rulo hızlarında demir içeriği oldukça yüksek, kaliteli bir ürün yakalanabilmiş, kalan kısımların daha düşük rulo hızlarında tekrar ayırıcıdan geçirilmesi ile yine bir manyetik ürün yakalama imkanı oluşmuştur. Şekil 3'de belirtilen yöntem, manyetik ürün yakalanamayana kadar rulo hızı düşürülerek devam ettirilmiş ve her aşamada alınmış olan ürünler ayrı ayrı analize tabi tutulmuşlardır.

Zenginleştirme çalışmalarında ilk hedef olarak toz (-10 mm) ve kalibre (-30+10 mm) tane boyutlarında, Çizelge 2'de verilen özelliklere uygun niteliklerde ürün üretilmesine yönelik testler planlanmış ve deneysel çalışmalar bu çerçevede yürütülmüştür. Yüksek alan şiddetli kuru manyetik ayırma ile rulo hızı değiştirilerek hem Fe tenörü %60'ın üzerinde olan, hem de safsızlık

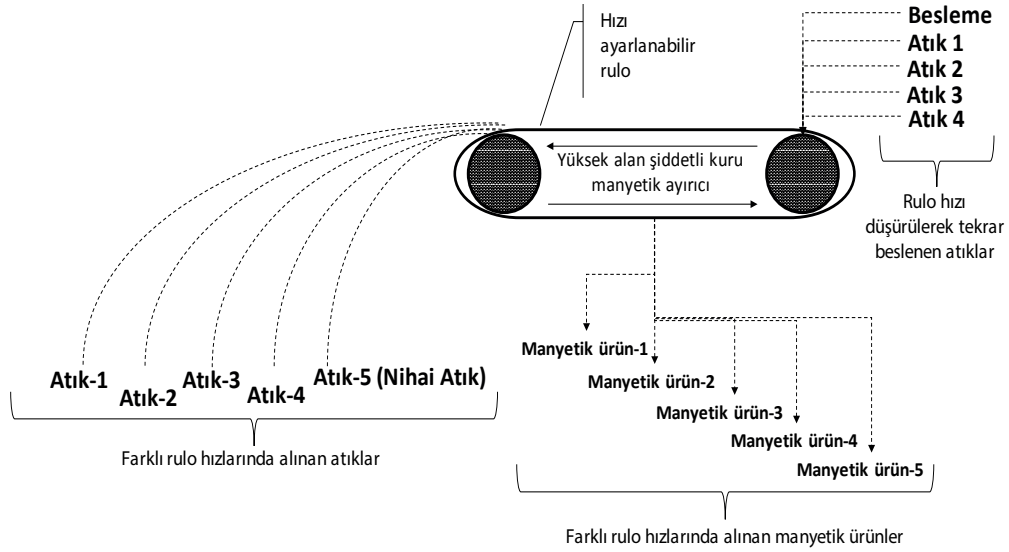
değerleri baz terkip olarak belirtilen değerlere çok yakın ürünlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple kademeli olarak yapılan manyetik ayırma ile tek kademe ve ortalama hızla elde edilebilecek ürünlerden oldukça farklı özellikteki ürünler elde edilebilmesi ve en az demir kaybı ile impürite değerleri red sınırının altında olan ürünlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Devamında gerçekleştirilen manyetik ayırma testleri doğrultusunda kütle denkleğinden bağımsız bir tesis akım şeması oluşturulmuştur.

Çizelge 2. Toz ve kalibre cevher için ulaşılmaması gereken ürün özellikleri

	Toz (-10mm)		Kalibre (-30+10mm)	
	Baz terkip %	Ret sınırı %	Baz terkip %	Ret sınırı %
Fe	53	50	54	50
SiO ₂	7,5	10	7,5	10
S	0,1	0,2	0,1	0,15
P	-	0,25	-	0,25
As	-	0,15	-	0,15
Cu	-	0,2	-	0,2
Al ₂ O ₃	1,6	2,5	1,6	2,5
TA*	0,5	0,7	0,5	0,7
Pb	-	0,1	-	0,1
Zn	-	0,1	-	0,1
TiO ₂	-	0,4	-	0,4

*TA=Toplam Alkali (K₂O+Na₂O)

Cevher genel itibari ile silikatlar, alkali mineraller ve demir içermektedir. Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında -30+10, -10+4,75, -4,75+2 mm fraksiyonlarına ve ayrıca -30+2 mm fraksiyonuna, cevherden safsızlıkların uzaklaştırılmasına ilişkin elde edilecek bulgular açısından oldukça önemli olan yüzdürme-batırma testleri uygulanmıştır. Demir minerallerinin yoğunlukları genel olarak 2,96 g/cm³'den büyük olduğundan bunlar ağır sıvı içinde batmakta, silikat ve alkaliler ise yoğunlukları bu değerden düşük olduğundan ağır sıvı içinde yüzmektedirler. Bu sebele 2,96 g/cm³ yoğunluğa sahip ağır sıvı (tetrabromoethane) kullanılarak tek yoğunlukta yüzdürme batırma



Şekil 3. Deneysel test yöntemi genel şeması (Rulo hızı yüksekten düşüğe doğru değişmektedir)

testleri gerçekleştirilmiştir. Bu sayede düşük ve yüksek yoğunluktaki minerallerin birbirlerinden ideal koşullarda ayrılabilirliklerinin ortaya konulması planlanmıştır. Ek olarak, ağır sıvı test sonuçlarından hareketle kurulması muhtemel bir ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler simülasyon yoluyla değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Manyetik Ayırma Testleri

Ana beslemeden elenerek ayrılan -30+10mm, -10+4,75mm ve -4,75+2mm tane boyutları ile gerçekleştirilen manyetik ayırma testlerine ilişkin ayırım ürünleri, miktarları ve temel içerikleri Çizelge 3'de özetlenmektedir. Benzer şekilde ana beslemenin tümünün -10mm'ye kırılmasıyla elde edilen -10 mm'lik besleme ve tümü -10 mm'ye kırıldıktan sonra -2 mm tane boyu uzaklaştırılarak elde edilen -10+2 mm'lik beslemelerle yapılan manyetik ayırma test sonuçları da Çizelge 4'de özetlenmiştir. Çizelge 3 incelendiğinde, -30+10 mm tane boyutunda %53,7 demir içerikli bir beslemeden %61'in üzerinde demir içeren kaliteli bir ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Buna karşın demir içeriği %38 seviyesinde olan bir nihai atık ayrılabilmiştir. Bu fraksiyonda ağırlıkça kazanım %67 civarında olmaktadır (Şekil 4). Uzaklaştırılan atığın SiO_2 içeriği %25 gibi yüksek

seviyelerde olurken, konsantrede bu değer %5'in altına düşmektedir. Konsantrenin Al_2O_3 ve toplam alkali içeriğinde de önemli bir düşüş görülmektedir. Bu fraksiyon için hedef değerlerin oldukça üzerinde bir ürün üretmek mümkün olmuştur.

-10+4,75 mm fraksiyonunda ağırlık verimi %88 düzeyinde olurken demir kazanımı da %93 gibi oldukça yüksek bir seviyeye çıkmaktadır (Şekil 5). Yüksek hızlarda %60'ın üzerinde demir içeren ürün elde edilebilmesine rağmen (Çizelge 3) bu tür bir ürün için demir verimi %40'ın altına düşmektedir (Şekil 5). Fakat buna rağmen; düşük hızlarda impürite içerikleri hedef değerlerin altında olan, demir içeriği ise %56 ile hedef değer üzerinde olan bir ürün kazanımının mümkün olabileceği görülmektedir. Bu aşamada atığın demir içeriği %28 düzeyinde kalırken impürite içerikleri de son derece yüksek düzeydedir.

-4,75+2 mm fraksiyonu ile yapılan manyetik ayırma testleri incelendiğinde, düşük hızlarda ağırlık kazanımının çok yükseldiği ve nihai atık miktarının son derece düştüğü görülmektedir (Çizelge 4 ve Şekil 6). Fakat dördüncü rulo hızında alınan ürünün Fe içeriği %54,62 olarak ölçülmüştür. Buna rağmen impürite içerikleri hedef değerlerin altına düşmektedir. Ürün özellikleri hedef değerlere uyum sağladığı anda verim değeri %94 seviyelerinde olabilmektedir (Şekil 6). Daha kaliteli ürün hedeflenmesi durumunda ise verim kaybı olmaktadır.

Çizelge 3. -30 mm tane boyu fraksiyonlarının farklı rulo hızlarında kademeli olarak elde edilen manyetik ayırma ürünlerinin kimyasal içerikleri

-30+10mm								
	Ağırlık, %	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
M1*	22,50	61,54	0,33	0,88	0,13	0,33	0,00	3,02
M2	12,30	62,82	0,54	0,89	0,13	0,32	0,00	3,21
M3	7,70	60,57	0,85	0,82	0,14	0,32	0,00	4,05
M4	15,80	60,63	0,56	0,99	0,18	0,34	0,00	4,41
M5	8,60	60,10	0,59	1,20	0,27	0,35	0,00	4,74
Nihai Atık	32,99	38,39	1,49	4,88	1,66	0,60	0,05	25,20
-10+4,75mm								
	Ağırlık, %	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
M1	34,01	60,44	0,36	1,06	0,18	0,33	0,00	4,22
M2	20,03	58,73	0,59	1,32	0,26	0,37	0,01	6,47
M3	15,22	53,90	0,76	1,74	0,39	0,40	0,00	8,55
M4	18,88	48,83	0,96	2,71	0,76	0,49	0,02	14,65
Nihai Atık	11,86	28,15	1,66	7,90	2,93	0,91	0,08	33,30
-4,75+2mm								
	Ağırlık, %	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
M1	14,12	60,52	0,51	1,47	0,30	0,40	0,01	5,48
M2	31,62	58,99	0,55	1,64	0,32	0,39	0,02	6,54
M3	33,30	52,91	0,86	2,46	0,58	0,48	0,02	11,10
M4	15,31	43,87	1,24	3,96	1,09	0,62	0,04	18,75
Nihai Atık	5,64	26,42	2,44	7,42	2,63	0,79	0,09	34,40

*M:Manyetik Ürün

Daha yüksek verim değerlerine ulaşılabilmesi amacıyla cevherin tümü 10mm'nin altına kırılarak hem doğrudan -10 mm'ye hem de -10 mm içinden -2 mm ayrıldıktan sonra kalan -10+2 mm'ye farklı hızlarda manyetik ayırma işlemi uygulanmış (Çizelge 4) ve sonuçları Şekil 7 ve Şekil 8'de değerlendirilmiştir. Cevherin tümünün 10mm'nin altına kırılması ile toplam atık miktarı %6,6 düzeyine indirilmiş ve ağırlık kazanımında %94 seviyesine ulaşmıştır. Burada uzaklaştırılan atık oldukça yüksek silis ve alkali içeriğine sahip bir malzemedir. Cevherin ağırlıkça yaklaşık %94'ü ürün olarak alındığında demir içeriği %2 gibi bir artış göstermekte ve safsızlık içerikleri red sınırlarının altına çekilebilmektedir. Ayrıca işletme sırasında rulo hızı artırılarak bir miktar cevher kaybi ile daha kaliteli ürün üretmek ve

sürekli emniyetli sınırlarda kalmak mümkün olabilmektedir (Şekil 7).

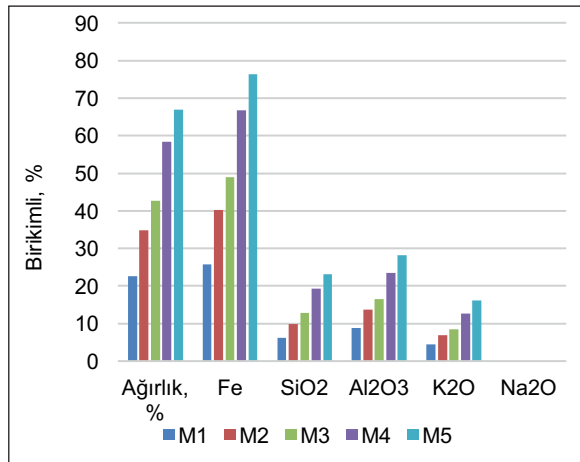
-30+10 mm, -10+4,75 mm ve -4,75+2 mm tane boyu fraksiyonları ile -10mm ve -10+2mm'lik beslemelerle elde edilen ürünlerin birleştirilmiş ağırlıkları her bir aşama ve içerik için (Fe, SiO₂, Al₂O₃ ve toplam alkali) birikimli olarak sırasıyla Şekil 9, 10, 11 ve 12'de verilmektedir. Düşük hızlara inildiğinde ağırlık kazanımı yükselmiş ve uzaklaştırılan safsızlık miktarları önemli ölçüde düşmüştür. Örneğin -4,75+2mm tane boyu ile yapılan testlerde en düşük hızda alınan ürünün Fe içeriğinin %54,62 olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan SiO₂ içeriği, Al₂O₃ ve toplam alkali içerikleri sırasıyla %10, %2,5 ve %0,55 seviyeleriyle, hedef değerlerin kritik sınırlarına yükselmektedir.

Çizelge 4. -10 mm ve -10+2 mm besleme numunelerinin farklı rulo hızlarında kademeli olarak elde edilen manyetik ayırma ürünlerinin kimyasal içerikleri

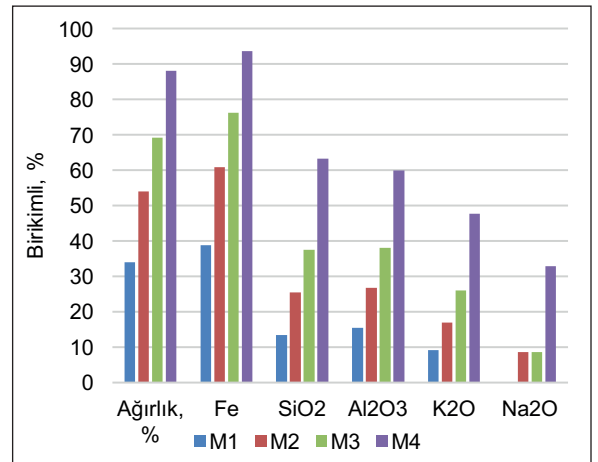
-10 mm								
	Ağırlık, %	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
M1*	19,52	60,4	0,48	1,48	0,281	0,4	0,009	5,51
M2	15,04	57,86	0,63	1,79	0,372	0,42	0,014	7,19
M3	10,27	54,69	0,65	1,82	0,397	0,41	0	7,76
M4	17,66	54,23	0,75	1,99	0,468	0,44	0,012	9,78
M5	15,4	52,89	0,85	1,98	0,494	0,42	0,012	10,35
M6	15,52	47,86	1,03	2,89	0,821	0,47	0,037	16,6
Nihai Atık	6,59	29,52	2,04	7,83	2,96	0,74	0,082	33,6

-10+2 mm								
	Ağırlık, %	Fe	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂
M1	11,33	61,68	0,33	0,97	0,149	0,34	0	3,44
M2	8,52	62,23	0,41	1,12	0,196	0,35	0	3,82
M3	12,4	58,37	0,52	1,22	0,22	0,34	0	5,03
M4	17,58	58,33	0,52	1,46	0,294	0,38	0,007	6,1
M5	23,08	55,76	0,7	1,54	0,345	0,39	0	7,93
Nihai Atık	27,1	42,83	1,46	4,49	1,5	0,59	0,047	21,7

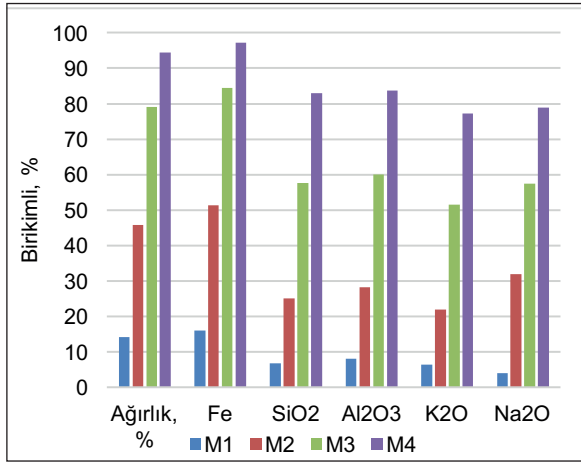
*M:Manyetik Ürün



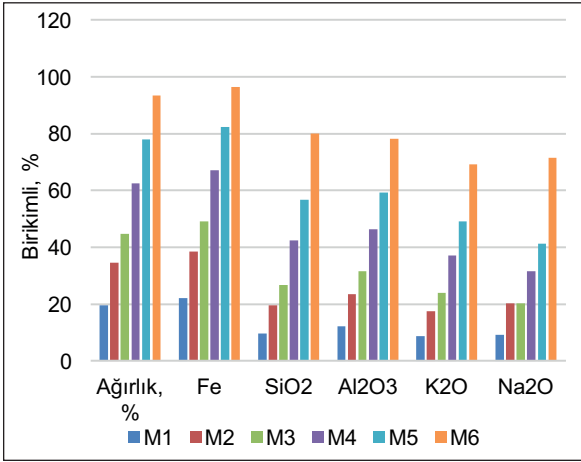
Şekil 4. -30+10 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



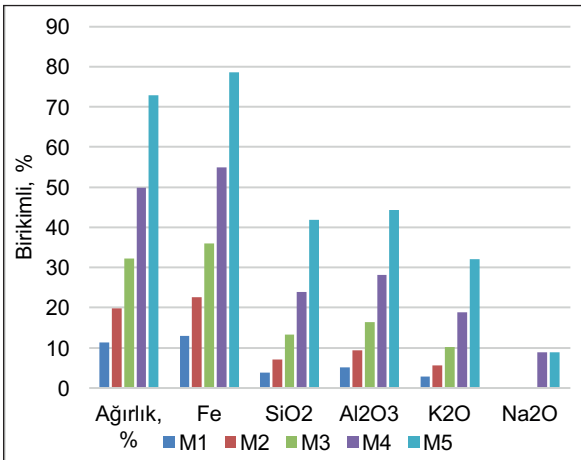
Şekil 5. -10+4,75 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



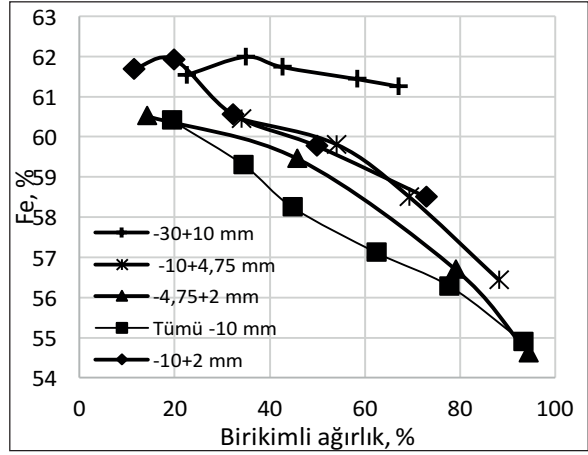
Şekil 6. -4,75+2 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



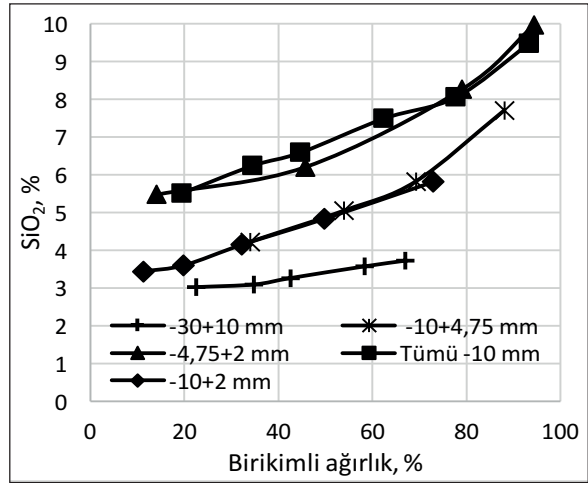
Şekil 7. -10 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



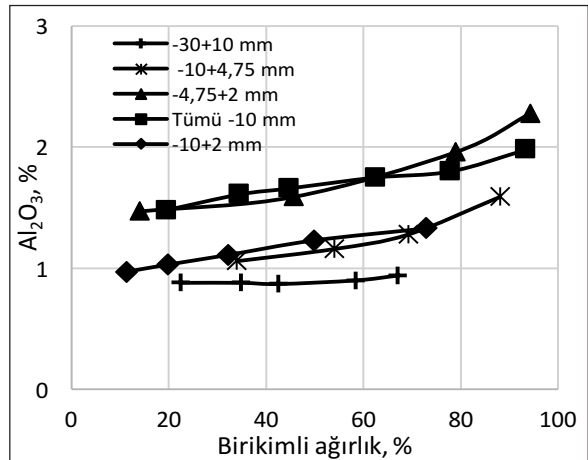
Şekil 8. -10+2 mm fraksiyonu manyetik ayırma verimleri



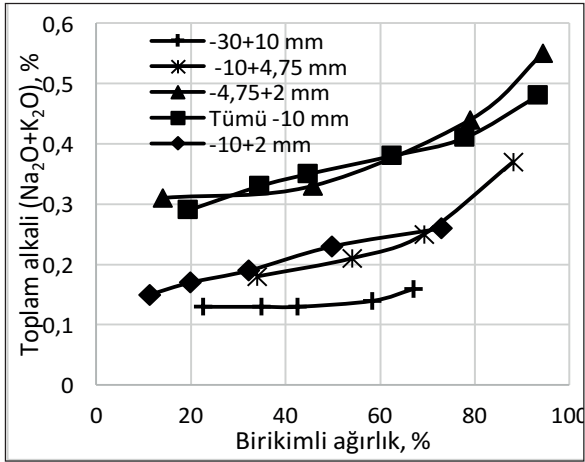
Şekil 9. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % Fe içeriklerinin değişimi



Şekil 10. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % SiO₂ içeriklerinin değişimi



Şekil 11. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % Al₂O₃ içeriklerinin değişimi



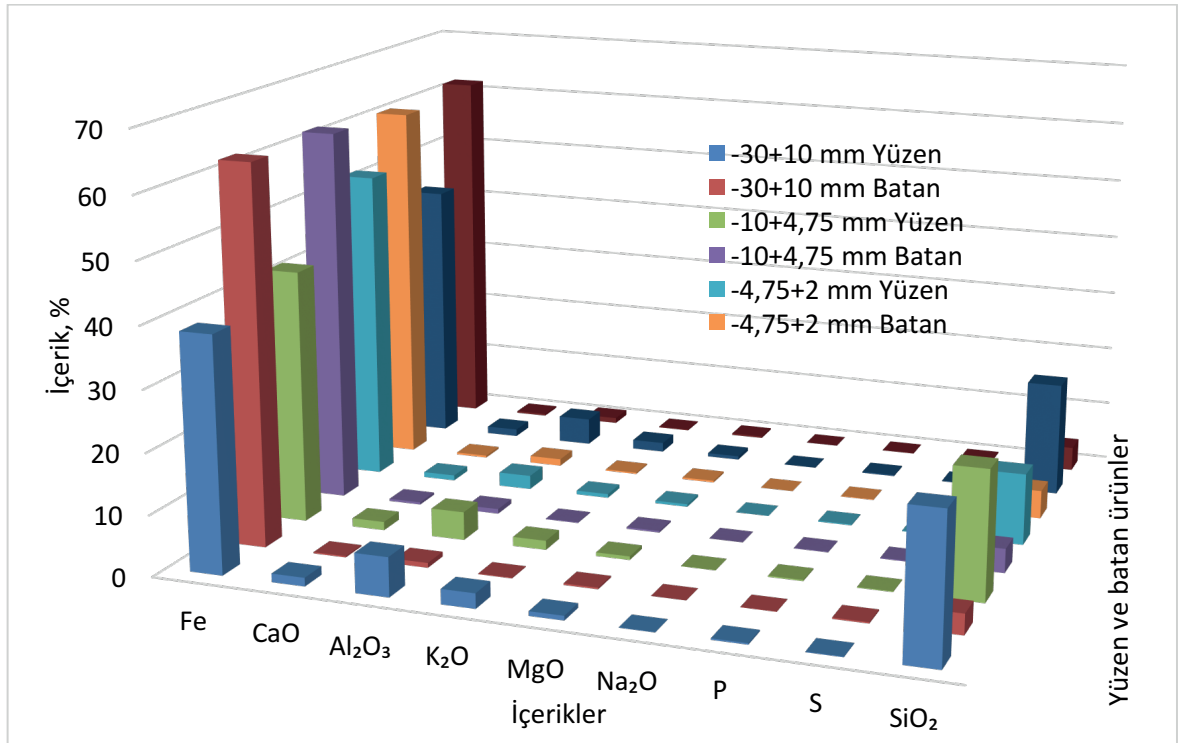
Şekil 12. Farklı tane boyutlarında ve azalan rulo hızlarında alınan manyetik ürünlerin birikimli % toplam alkali içeriklerinin değişimi

2.2. Ağır Sıvı Testleri

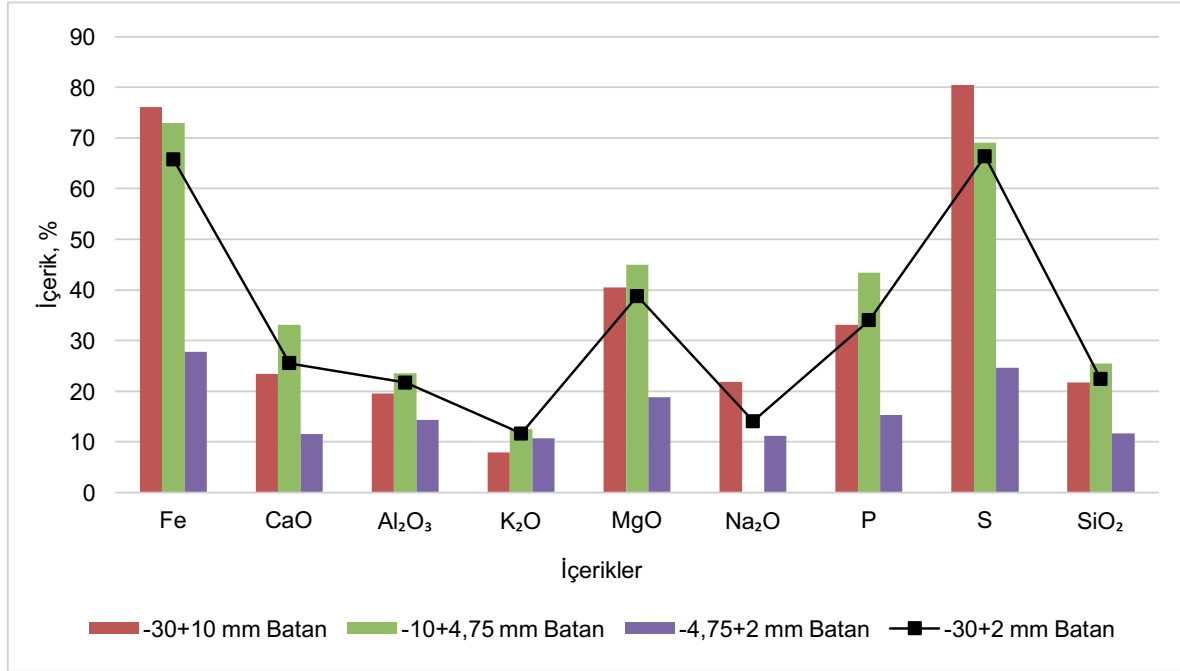
Cevherden kuru olarak elenerek ayrılan -30+10mm, -10+4,75 mm, -4,75+2 mm fraksiyonlarına ve ayrıca -30+2 mm fraksiyonuna 2,96 g/cm³ yoğunluğa sahip ağır sıvı kullanılarak yüzdürme batırma testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuç-

lar Şekil 13'de verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; hem iri hem de ince tane boyutlarında son derece yüksek demir içeriğine sahip, alkali içeriği ise hedef değerleri sorunsuzca sağlayacak düzeyde ürün elde edilmesi mümkün olmaktadır. Fakat bu ayrımlarda önemli miktarda ağırlık kaybı olmakta ve bu durumda da demir kaybının önemi ortaya çıkmaktadır. Şekil 14'de ise ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşenler için verim değerleri verilmektedir. Genel olarak; bu şekilde bir ayırım sonucunda ürün kalitesini bozan silikat ve alkaliler çok yüksek oranda ayrılırken beslemedeki demirin %25-35'i kaybedilmektedir.

Demir cevheri safsızlıklarının uzaklaştırılması açısından ağır sıvı testleri önemli bulgular ortaya koymaktadır. Cevherin endüstriyel olarak yaş zenginleştirilmesinin planlandığı durumda üretilen ürün kalitesinde herhangi bir sorun olmayacaktır. Fakat bu durum ağır ortam ayırımında oluşacak atık miktardan dolayı ikinci planda kalmaktadır. Laboratuvar ağır sıvı test sonuçları kullanılarak ilgili cevherin -30 mm beslemesinin ağır ortam ayırıcısında ayrılma ürünleri simülas-



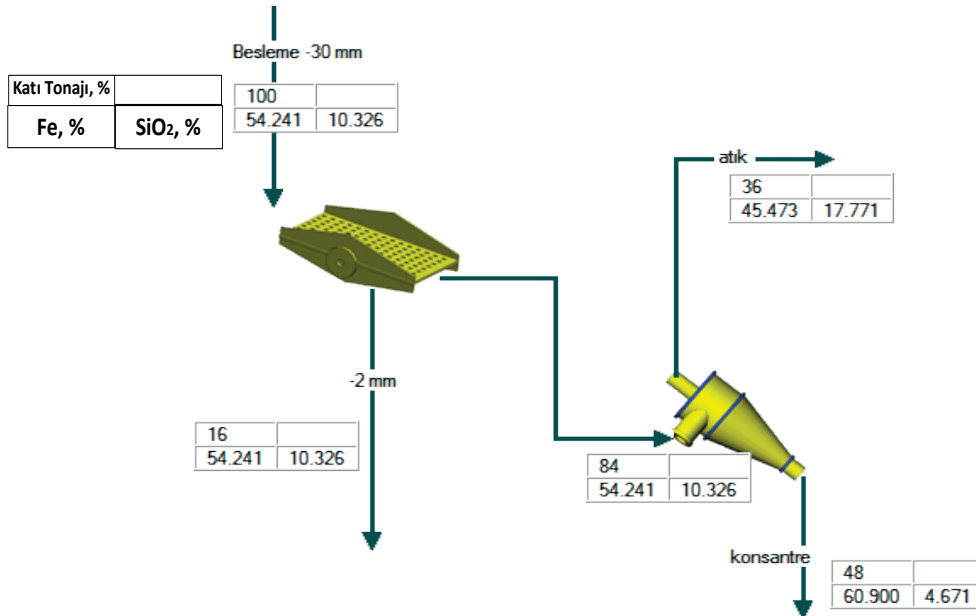
Şekil 13. Farklı tane boyutlarında 2,96 g/cm³ yoğunluğundaki ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşen miktarlarının yüzen ve batan ürünlerdeki dağılımı



Şekil 14. Ağır sıvı testlerinde elde edilen demir ve diğer bileşenler için farklı tane boyutlarının 2,96 g/cm³ yoğunlukta batan ürünlerinin verim değerlerinin dağılımı ve -30+2 mm fraksiyonu ile karşılaştırılması

yonla belirlenmiştir. Bir ağır ortam devresindeki ayırım performansı da göz önünde bulundurularak ağır sıvı test sonuçlarından hareketle kurulması muhtemel bir ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler Şekil 15'de verilmektedir. Simülasyonda endüstriyel ayırıcıların muhtemel performans bozuklukları da hesap-

lamalara katılmıştır. Ayrımlarda özellikle demir ve ağırlık verimlerinin yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Ürün kalitesi de safsızlıklar açısından sorunsuz olduğu görülmektedir. Fakat kayıplar açısından değerlendirildiğinde, kademeli olarak yapılan kuru manyetik ayırma daha tercih edilebilir görülmektedir.



Şekil 15. Ağır ortam zenginleştirme devresi ve bu devreden elde edilecek ürünler

3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışma kapsamında, Demir Export A.Ş.'ye ait demir cevheri numunesinin zenginleştirilmesine yönelik gerçekleştirilen kademeli kuru manyetik ayırma ve ağır sıvı testleri değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde görülmektedir ki ürün özellikleri hedef değerlere uyum sağladığı anda verim değeri %94 seviyelerinde olabilmektedir. Daha kaliteli ürün hedeflenmesi durumunda ise verim kaybı oluşmaktadır. Cevherin 30 mm'nin altına kırılması ve kırılmış cevherden elenerek ayrılan -30+10 mm ile -10 mm fraksiyonlarının düşük hızda 6000 gauss alan şiddetine sahip kuru manyetik ayırıcıda ayrılması sonucu elde edilecek ürünlerin ve oluşacak toplam atığın genel özellikleri Çizelge 5'de verilmektedir. Burada atılan %18,17 oranındaki atığın %13,11'i -30+10 mm fraksiyonunun işlenmesinden %5,06'sı da -10mm'nin işlenmesinden kaynaklanmaktadır. -10mm ürünün oluşturulmasında 10 mm'nin altındaki fraksiyonlara yapılan manyetik ayırma sonuçları ve -2 mm fraksiyonunun analiz değerleri birlikte değerlendirilmiştir.

Çizelge 5. Manyetik ayırma uygulaması sonucu öngörülen genel ürün özellikleri

%	-10mm ürün	-30+10 mm ürün	Nihai Atık	Besleme
Ağırlık	55,21	26,63	18,17	100
Fe	55,39	61,26	34,72	53,2
CaO	0,7	0,52	1,58	0,81
Al ₂ O ₃	1,99	0,94	5,63	2,37
K ₂ O	0,46	0,16	1,84	0,63
MgO	0,43	0,33	0,69	0,45
Na ₂ O	0,01	0	0,07	0,02
P	0,14	0,1	0,2	0,14
S	0,1	0,07	0,19	0,11
SiO ₂	9,01	3,72	28,09	11,07
Verim % Fe	57,48	30,66	11,86	100

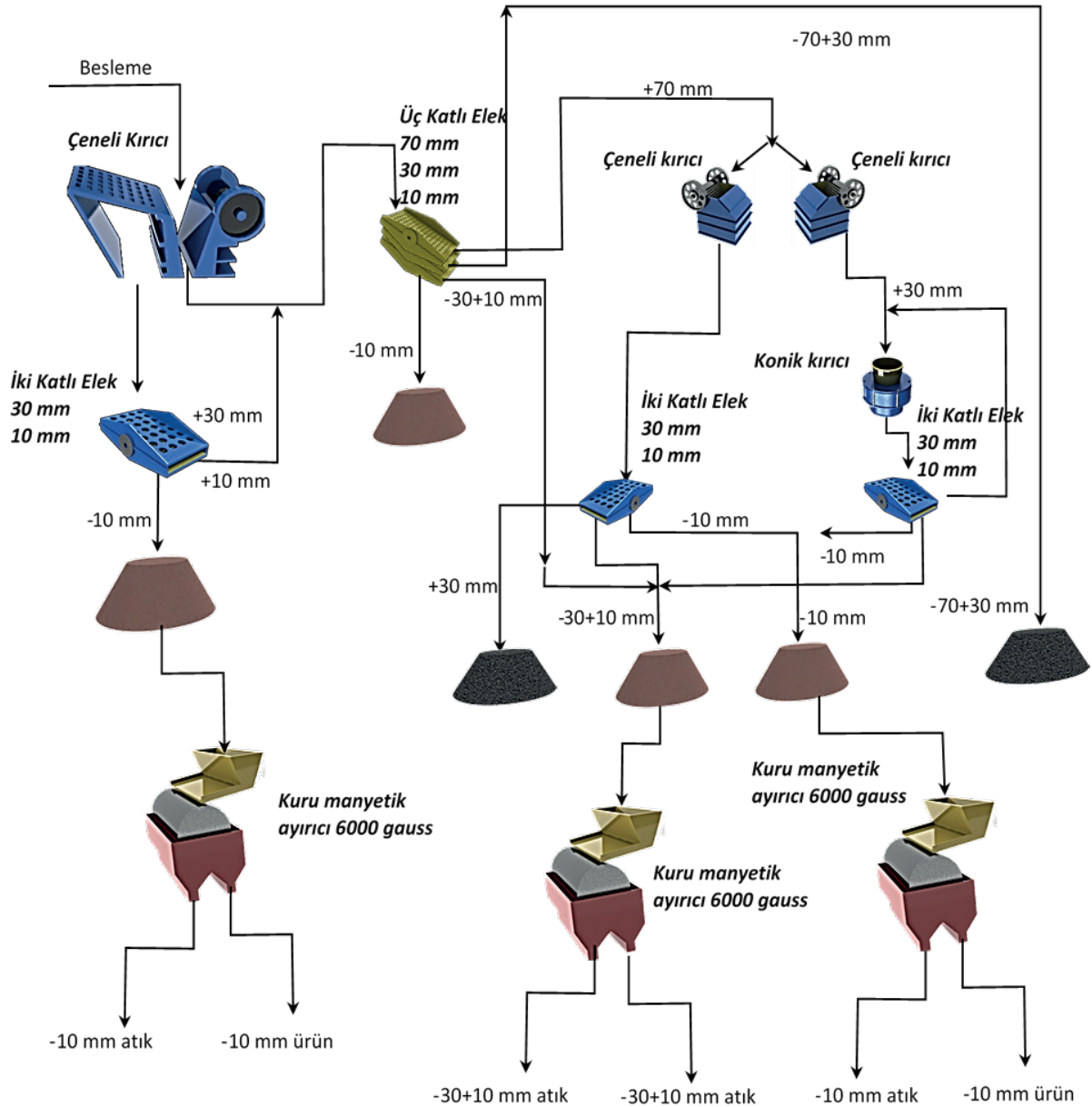
Cevher standart olarak 30mm'nin altına kırıldıktan sonra kalibre ve toz cevher olarak ayrılacak ürünlerin manyetik ayırıcıda temizlenmesi sonucu ağırlıkça yaklaşık olarak %80 oranında temiz cevher üretilebilmektedir. Kalibre ve toz cevher ağırlık oranları endüstriyel uygulamada kırıcı ürünle-

rinin miktarına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu temizleme işlemi sırasında toplam demir kazanımı %90 düzeyinde olmaktadır. Ürünlerin hedef değerlerini sağladığı görülmektedir. Bu sebeple üretim sırasında ürün kalitesinde oluşabilecek muhtemel sorunların; rulo hızı değiştirilerek giderilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tümü -10 mm'ye kırılmış cevher içinden -2mm ayrılmış ve elde edilen -10+2 mm fraksiyonuna kademeli manyetik ayırma uygulanmıştır. Böylece daha yüksek kaliteli ve yüksek verimle ürün üretilebilirliği incelenmiştir. Tümü -10mm'ye kırılmış cevher içinden -2 mm'nin ayrılması ile daha temiz içerikli bir ürün üretmenin mümkün olmayacağı sonucuna varılmıştır. Yüksek rulo hızlarında daha yüksek demir tenörüne ve düşük safsızlık içeriklerine ulaşılmasına rağmen verimde önemli bir artış olmamıştır. Ayrıca -2mm önden ayrıldığı için bu aşamada önemli bir kayıp oluşmaktadır. Bu nedenle cevher içinden -2 mm'nin ayrılması önemli bir kazanç sağlamamaktadır.

3.1. Cevhere Özgü Tesis Tasarımı

Değişen tane boyutlarında kademeli gerçekleştirilen manyetik ayırma testleri sonuçları, elde edilen farklı koşullardaki ürün kaliteleri, safsızlıkların uzaklaştırılması ve nihai ürünün kalite standartları göz önünde bulundurularak mevcut cevher için Şekil 16'da verilen örnek akım şeması tasarlanmıştır. Akım şemasında kırma devresini takiben ilgili cevherde manyetik ayırma uygulamalarının yerleştirileceği noktalar verilmiştir. Burada belirtilen -70+30 mm ve üst boyutu tam bilinmeyen (kırıcı seçimi ve ayarlarına bağlı olarak) +30 mm ürünler için manyetik ayırma uygulaması önerilmemektedir. Devrede bu ürünler sorun yarattığı durumda bunların miktarını değiştirmeye yönelik kırıcı ve elek ayarları değiştirilebilir. Şekil 16'da verilen akım şemasında ürün miktarları kırma devresine bağlı olacağından burada herhangi bir akış miktarı verilmemiştir. Fakat her bir noktaya yerleştirilecek manyetik ayırıcının kendi içindeki ayırım verimleri ve ürün özellikleri kullanılarak bu noktadaki ürün özellikleri belirlenebilir. Çalışmalarda kullanılan demir cevheri, uygun kırma devresi tasarımını takiben -30 mm'yi kırılarak Çizelge 5'de belirtilen nihai ürün ve atık kalitelerine ulaşılması mümkün olacaktır.



Şekil 16. Demir cevherinin zenginleştirilmesinde kullanılabilir örnek akım şeması

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmalarda kullanılan cevher genel yapısı itibarı ile hematit mineralinden oluşmakla birlikte, manyetikleşme nedeniyle bir miktar manyetik alınganlık da göstermektedir. Bu nedenle düşük alan şiddetli manyetik ayırıcılara herhangi bir tepki vermezken yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcılarda ayrılmaları mümkün olmuştur. Özellikle silikat, alümina ve alkali içeriği yüksek taneler manyetik ayırıcılarda ayrılabilen, buna bağlı olarak da nihai ürünün SiO_2 , Al_2O_3 ve

toplam alkali ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) içeriği azalmaktadır. Bu nedenle; cevher için -30+10 mm ve -10mm fraksiyonlarına yüksek alan şiddetli (yüzeyde 6000 gauss) kuru manyetik ayırma uygulanması ürün kalitesini yükseltecek ve impürite içeriklerinin sorun yaratmasına engel olacaktır. Daha iri tane boyutlarında manyetik ayırıcı uygulaması, cevherin manyetik alınganlığının düşük olması ve bu boyda serbestleşme sorunları nedeniyle oluşacak ürün kayıpları dikkate alındığında gereksiz görülmektedir.

Tesiste uygulanacak manyetik ayırma işleminde;

- -30+10 mm fraksiyonunda ağırlıkça %68, -10 mm fraksiyonu için ağırlıkça %92 oranında ürün alınmaktadır.

- Manyetik ayırıcıya beslenen tane boyutu incelendiğinde ürün miktarları da artmaktadır. Bu durumda daha iri tane boyutlarının manyetik ayırmaya tabi tutulması oldukça önemli miktarda üretim kaybına neden olabilir.

Testlerde kullanılan cevher hem demir içeriği hem de safsızlık içerikleri açısından satılabilir ürün özelliklerine yakın değerler içermektedir. Manyetik ayırma ile nihai ürün demir içeriğinde önemli artışlar sağlanırken safsızlık içerikleri red sınırlarının altına çekilebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında özellikle ürün kalitesini garanti altına almak açısından devrede -30+10 mm ve -10 mm ürünlerin alındığı nihai noktalara 6000 gauss değerinde yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı yerleştirilmesi önemli bir çözüm olarak görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Demir Export A.Ş.'ye veri kullanımı ve yayılması konusundaki desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Chen, L., Liao, G., Qian, Z., Chen, J., 2012. Vibrating High Gradient Magnetic Separation for Purification of Iron Impurities Under Dry Condition. *International Journal of Mineral Processing*, 102–103, 136-140.

Ezhov, A.M., Shvaljov, Y.B., 2015. Dry Magnetic Separation of Iron Ore of the Bakchar Deposit. *Procedia Chemistry*, 15, 160-166.

Kuskov, V.B., Nikitin, M.V., 2002. Enrichment

and Processing of Minerals. St. Petersburg: St. Peterburg's Mining Institute.

Napier-Munn, T.J., 1991. Modelling and Simulating Dense Medium Separation Processes — A progress report *Minerals Engineering*, 4 (3–4), 329-346.

Rachappa, S., Prakash Amit, Y., 2015. Iron Ore Recovery from Low Grade by Using Advance Methods. *Procedia Earth and Planetary Science*. 11, 195-197.

Seifelnassr, A.A.S, Moslim, E.M., Abouzeid, A.Z.M., 2013. Concentration of a Sudanese Low-grade Iron Ore. *International Journal of Mineral Processing*, 122, 59-62.

Srivastava, U., Kawatra, S.K., 2009. Strategies for Processing Low-grade Iron Ore Minerals. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 30 (4), 361-371.

Tripathy, S.K., Singh, V., Murthy, Y.R., Banerjee, P.K., Suresh, N., 2017. Influence of Process Parameters of Dry High Intensity Magnetic Separators on Separation of Hematite. *International Journal of Mineral Processing*, 160, 16-31.

Tripathy, S.K., Banerjee, P.K., Suresh, N., 2014. Separation Analysis of Dry High Intensity Induced Roll Magnetic Separator for Concentration of Hematite Fines. *Powder Technology*, 264, 527-535.

Wills, B.A., Napier-Munn, T., 2005. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th Edition, ISBN: 9780080479477, p. 456.

Zeng, S., Zeng, W., Ren, L., An, D., Li, H., 2015. Development of a High Gradient Permanent Magnetic Separator (HGPMs). *Minerals Engineering*, 71, 21-26.



Orijinal Araştırma / Original Research

DOĞAL TAŞ PARLATMA SÜRECİNDE KALINLIK VE PARLAKLIK DEĞİŞİMİNİN SHEWHART KONTROL GRAFİKLERİ İLE İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THICKNESS AND BRIGHTNESS CHANGE WITH SHEWHART CONTROL CHARTS IN NATURAL STONE POLISHING PROCESS

Sevgi Çetintaş^{a,*}, İbrahim Nazlı^{b,**}

^a Akdeniz Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Çevre Koruma Teknolojileri, Antalya, TÜRKİYE

^b Şenler Mermer, Afyonkarahisar, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 21 Eylül / September 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 16 Şubat / February 2018

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Shewhart,
Kalite,
Kontrol grafiği,
Doğal taş.

Son yıllarda gelişen teknoloji ve rekabet koşullarında, piyasaya sunulan ürünlerin istenilen kalite şartlarına uygunluğunu sağlamak için üretim aşamasında oluşabilecek hataları azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Üretim aşamasının geliştirilmesi, iyileştirilmesi ve kontrolünün sağlanması sürecinde istatistiksel kalite kontrol büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Afyonkarahisar/ Türkiye doğal taş fabrikasında üretimi yapılan iki farklı doğal taş örneklerinin süreç içerisinde hedeflenen kalınlık ve parlaklık değerlerinde meydana gelebilecek değişimlerin tespiti amacıyla Shewhart (Değişken nicelikler için kontrol grafikleri) kontrol grafikleri elde edilmiştir. İstatistiksel proses kontrol teknikleri, üretim süreçlerinin iyileştirilmesi, geliştirilmesi ve kontrolünü sağlama konusunda işletmelere yardımcı olmaktadır. İstatistiksel proses kontrol teknikleri sayesinde üretim süreçlerinde yaşanan sorunlar tespit edilebilmekte ve nedenleri araştırılarak aynı olumsuzlukların yaşanmaması için önlemler alınabilmektedir.

ABSTRACT

Keywords:

Shewhart,
Quality,
Control chart,
Natural stone.

In recent years, several studies have been conducted to reduce the defects that may occur during the production phase with a view to ensure that the products introduced to the market under developing technology and competitive conditions meet the desired quality requirements. Statistical quality control is vital for the process of enhancing, improving and controlling the production phase. In this study, Shewhart control charts (the control charts for variables) are obtained for the purpose of identifying any potential change in the thickness and brightness values for two different natural stone samples produced in the natural stone plant in Afyonkarahisar / Turkey. Statistical process control techniques, which play a key role in those quality studies, help businesses improve, enhance and control the production processes. Thanks to statistical process control techniques, the problems experienced during the production processes could be identified and the causes of those problems could be analysed to take action in order to prevent recurrence of the situation..

* Sorumlu yazar: scetintas@akdeniz.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-4180-4895>

** yahyali39@hotmail.com • <https://orcid.org/0000-0003-4812-6158>

GİRİŞ

Kalite (Qualites) Latince. “nasıl oluştuğu” anlamına gelen “qualis” kelimesinden türemiştir ve bir ürünün, istenen görevi daha iyi yapabilme (müşteri beklentilerini azami düzeyde sağlayan) veya her zaman aynı şekilde yapabilmesi (sürekli iyileştirme) için sahip olması gereken özellik olarak tanımlanmıştır (Özdemir, 2000). Kalite Kontrol ise bir organizasyondaki değişik grupların kalite geliştirme, kaliteyi koruma ve kalite iyileştirme çabalarını, müşteri tatminini de göz önünde tutarak üretim ve hizmeti en ekonomik düzeyde gerçekleştirebilmek için birleştiren etkili bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Ayhan, 2007).

Bir ürünün kaliteli olup olmadığının belirlenebilmesi için bu ürünün belirli özellikler bakımından önceden belirlenmiş olan standart değerlere sahip olması ve üründen elde edilen değerlerin, bu standart değerlerle karşılaştırılabilmesi gerekir. Bu bağlamda; kalite kontrolü herhangi bir ürünlerdeki kaliteyi korumak, geliştirmek ve bu ürünün üretimini tüketicinin tatmin olabileceği en ekonomik düzeyde sürdürebilmek için uygulanan bir dizi işlemleri kapsar (Kartal 1999).

Günümüzde kalite araçları, çeşitli alanlara göre aralarında tanımlamaya ve farklılaştırmaya çalışmıştır. Kalite araçları genelde bir değişikliği gerçekleştirmek anlamına gelir ve yedi temel kalite aracından bahsedilmektedir. Bunlar;

- Süreç akış şeması,
- Pareto diyagramı,
- Çetele diyagramı,
- Kontrol grafiği,
- Histogram,
- Serpilme diyagramı
- Neden - sonuç diyagramıdır.

Problemi belirlemek amacıyla kullanılan kalite araçları ise;

- Süreç akış şeması,
- Neden - sonuç diyagramı,
- Çetele diyagramı,
- Pareto analizi, histogram
- Kontrol grafikleridir.

Problemi analiz etmek amacıyla kullanılan kalite araçları beşe ayrılır. Bunlar;

- Neden - sonuç diyagramı,
- Çetele diyagramı,
- Pareto analizi,
- Serpilme diyagramı
- Kontrol grafikleridir.

Analiz edilen problemlere çözüm geliştirmek için süreç akış şeması ve serpilme diyagramı faydalı sonuçlar verebilir. Kalite araçlarının uygulamasının sonuçları değerlendirilirken çetele diyagramı, pareto analizi, histogram, serpilme diyagramı ve kontrol grafikleri kullanılabilir (Paliska vd., 2007). Kontrol grafiklerinin gücü, süreçte meydana gelen ve kaliteyi etkileyen belirlenebilir nedenleri ayırabilmesindedir. Böylece birçok üretim sorununun teşhisi ve düzeltilmesi mümkün olur (Burnak 1997).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bazı kontrol grafiği türleri; Shewart, Ewma ve Cusum kontrol grafiğidir. Shewart kontrol grafikleri istatistiksel kalite kontrolün temel araçlarındandır. Bu grafikler hem süreçlerin hassasiyetini ölçmede hem de endüstriyel süreçlerde devredilebilir nedenlerin oluşumunu tespit etmede yararlıdır (Topalidou and Stelios, 2009). CUSUM kontrol grafiği, Shewart kontrol grafiklerinin örneklem ortalamalarındaki küçük ancak sürekli kaymalara karşı duyarsızlığı nedeniyle, bu grafiklere alternatif olarak geliştirilen dört grafik türünden birisidir. Cusum kontrol grafiği örneklem değerlerinin hedef değerden cebirsel sapmalarının kümülatif toplamını (Si) grafik üzerine işaretleyerek örneklem verilerindeki bütün bilgiyi dikkate almaktadır. Ewma kontrol grafikleri ise; yaklaşık olarak Cusum kontrol grafikleri ile eşdeğer etkiye sahiptir. Zaman serileri tahmini için yaygın olarak aynı teknolojiyi kullanmalarına rağmen her ikisi de henüz çok popüler değildir (Trietsch, 1999: 218).

Kalite kontrolü, yapılan işin doğru yapılıp yapılmadığının belirlenebilmesi, işlem sırasında cihazların optimum kullanılabilmesi, üretim sırasında oluşan hatalı ürünlerin tespit edilip, bu hataların düzeltilmesi ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle kalite kontrolünün doğru ve güvenilir

yapılması gerekmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda; tekstil (Ala ve İkiz 2015), gıda (Başaran 2010, Çakırkaya ve Acar 2016), elektronik (Yıldırım ve Karaca 2013), metal (Zeyveli 2010) ve maden (Vapur vd., 2005, Elevli ve Behdioğlu 2006, Akçil 2014) gibi farklı sektörlerde istatistiksel kalite kontrol grafikleri kullanılarak süreçler kontrol edilmiştir.

Doğal taş sektöründe de kalite kontrol ile ilgili farklı araştırmacılar tarafından çalışmalar yapılmıştır. Saraç ve Özdemir (2003) mermer fayanslarının boyutlandırılmasında istatistiksel kalite kontrolü üzerinde çalışmış olup, düzenli olarak yapılan istatistiksel çalışmaların ve formların düzenlenmesinin kaliteyi etkilediğini belirlemişlerdir. Akçakoca ve diğ. (2006) mermer traverten fabrikalarında ürün kalitesinde oluşan problemler konusunu irdelenmişlerdir. Akkoyun (2006), kalite kontrol grafikleri oluşturmak için bir bilgisayar yazılımının geliştirilmesi ve mermer sektöründe denenmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Ankara ve diğ., 2006, diskli blok kesme makinası ile kesilen Muğla Beyaz ve Sivrihisar beji mermer bloklarındaki levha kayıplarını Shewhart kontrol grafikleri ile belirlenmesini incelemişlerdir. Ankara ve Yerel (2008) çalışmalarında; doğaltaş levhalarının yüzey paralelliğini değişim kontrol grafikleri yardımıyla incelemiştir. Gürcan (2012) doğal taş standartlarındaki fabrika üretim kontrol sürecini incelemiş kalite kontrol süreçlerinin geliştirilmesi ve üretim sistemlerinin kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Bu çalışmada kalite kontrol grafiklerinden; Shewhart kontrol grafikleri kullanılarak, Afyonkarahisar' da faaliyet gösteren bir fabrikada iki farklı doğal taşın parlatma işlemi sonrası kalınlık ve parlaklık parametreleri dikkate alınarak, kalite kontrol grafikleri incelenmiştir. Elde edilen grafikler sayesinde doğal taşların kalınlık ve parlaklık ölçümlerindeki süreç kontrolü yapılmış ve kalitedeki olası sapmalar değerlendirilmiştir.

1. MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda, iki adet doğal taş örneği kullanılmıştır. Bunun için Afyonkarahisar'da faaliyet gösteren bir mermer fabrikasında

30x60x2 cm boyutundaki parlatma işlemine tabi tutulmuş plakalarda kalınlık ölçümleri yapılmıştır. Doğal taş örneklerinin kalınlık değerleri dijital kumpas yardımıyla 25 adet doğal taş örneğinde ölçüm yapılmıştır (Nazlı 2014). Her doğal taş örneğinde 5 noktadan ölçüm yapılmış ve kalınlık değerlerinin ortalamaları alınmıştır (Şekil 1).

Parlaklık ölçümünde Novo Gloss Trio marka Glossmetre kullanılmıştır (Şekil 2). Ebatlanmış doğal taş örneklerinin ortalama parlaklık değerinin belirlenmesi amacıyla, her bir plaka yüzeyinde 5 noktadan yapılan ölçümler kullanılmıştır.



Şekil 1. Kalınlık ölçümü görüntüsü



Şekil 2. Glosmetre cihazı ile ölçüm görüntüsü

Shewhart kontrol grafiğinde, hem örnek ortalamasının dağılımı hem de standart sapma veya değişim aralığına ait dağılımlar izlenir. Ortalama (\bar{x}) kontrol grafikleri; örnek ortalamalarının istenilen ortalamaya ya da genel

ortalamaya göre nasıl karşılaştırılacağını gösterir. Değişim aralığı (R) kontrol grafikleri; örnek içindeki bireysel gözlemlerin farklılığını belirler. Standart sapma (S) kontrol grafikleri; örnek standart sapmalarının ortalamaları ile ilişkili olduğu için bu grafikler alt grup dağılımlarının değişimini belirlemektedir (Demir ve Mirtagioğlu 2016). Shewhart kontrol grafiklerinde (\bar{x})-(R) veya (\bar{x})-(S) kontrol grafiği kullanılır (Ledolter ve Burrill 1999). Bunun nedeni ise örnek ortalamaları aynı olsa bile standart sapmalar veya değişim aralıkları büyük olursa süreç kontrol dışı olabilir.

\bar{x} - R Kontrol Grafikleri; \bar{x} -R grafik çifti istatistik kontrol durumunu ve süreçte meydana gelebilecek kaymanın büyüklüğünü belirlemek için kullanılabilir. Bu grafiklerin tasarımında maliyeti azaltmak için üretimden gelen tüm ürünlerin kontrolü yerine, belirli bir üretim miktarına ulaşıldıktan sonra belli bir miktar örnek alınmasına göre veya belirli zaman aralıklarında belli bir miktar örnek alınmasına göre yapılır (Demir ve Mirtakioğlu 2016).

\bar{x} -S Kontrol Grafikleri ise; \bar{x} ve R kontrol grafikleri en çok kullanılan kontrol grafikleridir. Ancak $n \geq 10$ olduğu durumda değişim aralığının etkinliği ve güvenilirliği azaldığından dolayı R kontrol grafiği yerine S kontrol grafiği kullanılır. Sınır çizgileri çizilirken kullanılan sabit faktör (A_2 , D_3 , D_4 , B_3 , B_4 vb.) değerleri Ek 1'de verilen "Kalite Kontrol Grafikleri Değişkenlikleri Çiziminde Kullanılan Faktörler" tablo yardımıyla elde edilmiştir. Ana kütle ortalaması ve standart sapması bilinmediği durumlarda \bar{x} kontrol grafiğinin kontrol sınırı; S kontrol grafiği kullanılır (Kartal 1999).

$$\text{Üst Kontrol Sınırı (ÜKS)} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (1)$$

$$\text{Orta Çizgi (OÇ)} = \bar{\bar{x}} \quad (2)$$

$$\text{Alt Kontrol Sınırı (AKS)} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (3)$$

Eşitlikleri kullanılarak düzenlenir (Burliskowska 2005).

Ana kütle veya örneklem içerisinde yer alan minimum ve maksimum değer arasındaki farka değişim aralığı denir ve R harfi ile gösterilir;

$$R = R_{max} - R_{min} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır (Montgomery 2005). Her biri n birimden oluşan m tane örnek alındığında, R_1, R_2, \dots, R_m bu örneklerin değişim aralıkları olmak üzere değişim aralıkları ortalaması (\bar{R}) olarak hesaplanmaktadır (Şentürk 2002). Ana kütle standart sapması bilinmediği durumlardan R grafiğinin kontrol sınırları;

$$\text{ÜKS} = \bar{R} D_4 \quad (5)$$

$$\text{OÇ} = \bar{R} \quad (6)$$

$$\text{AKS} = \bar{R} D_3 \quad (7)$$

eşitlikleri ile belirlenir.

S kontrol grafiği; ana kütle standart sapmasının bilinmemesi durumunda, kontrol sınırları;

$$\text{ÜKS} = B_4 \bar{S} \quad (8)$$

$$\text{OÇ} = \bar{S} \quad (9)$$

$$\text{AKS} = B_3 \bar{S} \quad (10)$$

eşitlikleri yardımıyla hesaplanır (Kan 2005).

2. BULGULAR

2.1. Kalınlık Değerine Bağlı Kontrol Grafiklerinin İncelenmesi

Silim hattı sonrası plakalardan alınan her bir kalınlık ölçüm değerleri ile bu ölçüm değerlerinden elde edilen ortalama (\bar{x}), standart sapma (S) ve değişim aralığı (R) Çizelge 1'de verilmiştir. Örnekler için kontrol sınır değerleri verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Ek-1'de verilen tablo yardımı ile $A_2:0,577$; $B_3:0$; $B_4:2,08$; $D_3:0$; $D_4:2,115$ olarak alınmıştır ve elde edilen kontrol sınır değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

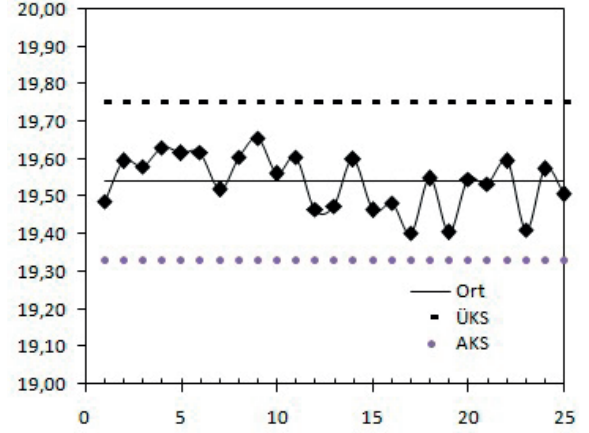
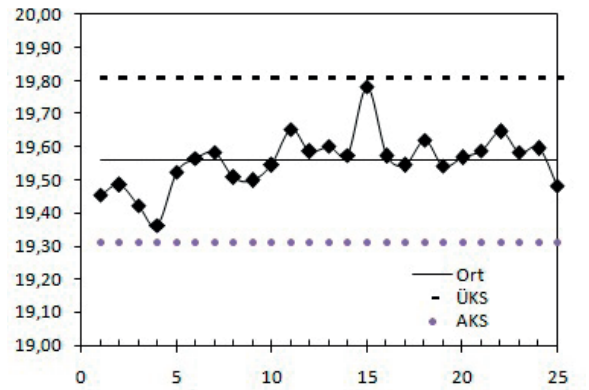
Çizelge 1. Kalınlık ölçümlerine (mm) ait ortalama \bar{X} , değişim aralığı R ve standart sapma S değerleri.

Afyon Şeker Örneği			Antalya Bej Örneği		
\bar{x}_i	R_i	S_i	\bar{x}_i	R_i	S_i
19,49	0,13	0,34	19,45	0,16	0,38
19,59	0,17	0,40	19,48	0,14	0,36
19,58	0,03	0,07	19,42	0,26	0,58
19,63	0,21	0,49	19,36	0,23	0,64
19,62	0,09	0,20	19,52	0,13	0,36
19,62	0,20	0,55	19,56	0,15	0,38
19,52	0,24	0,65	19,58	0,11	0,26
19,61	0,18	0,48	19,51	0,27	0,65
19,66	0,20	0,56	19,50	0,17	0,42
19,56	0,25	0,56	19,54	0,17	0,43
19,61	0,09	0,22	19,65	0,12	0,33
19,47	0,16	0,40	19,59	0,20	0,52
19,47	0,05	0,13	19,60	0,19	0,45
19,60	0,04	0,09	19,58	0,29	0,77
19,46	0,10	0,26	19,78	0,06	0,13
19,48	0,19	0,50	19,57	0,22	0,59
19,40	0,15	0,40	19,54	0,10	0,27
19,55	0,11	0,26	19,62	0,10	0,27
19,40	0,25	0,60	19,54	0,20	0,48
19,55	0,14	0,35	19,57	0,24	0,58
19,53	0,07	0,17	19,59	0,17	0,41
19,59	0,10	0,24	19,65	0,14	0,34
19,41	0,20	0,50	19,58	0,17	0,41
19,57	0,15	0,37	19,60	0,14	0,34
19,51	0,17	0,40	19,48	0,14	0,32

Çizelge 2. Kalınlığa ait kontrol grafiği sınır değerleri

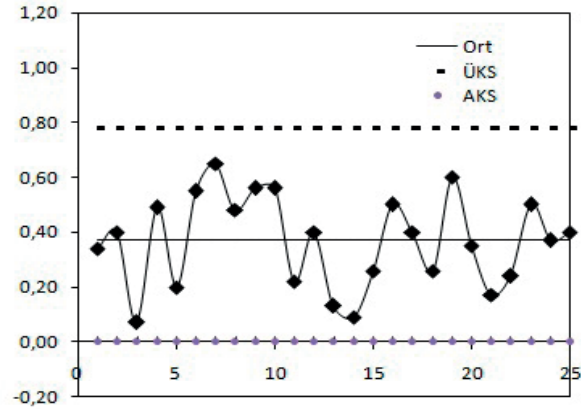
	Kontrol Sınırı	\bar{x}_i	R_i	S_i
	ÜKS	19,75	0,78	0,30
Afyon Şeker	OÇ	19,54	0,37	0,15
	AKS	19,33	0,00	0,00
	ÜKS	19,81	0,91	0,91
Antalya Bej	OÇ	19,56	0,43	0,43
	AKS	19,31	0,00	0,00

Çalışmada kalınlık değerlerine ait Shewhart kontrol grafiği standart kullanım yöntemi ile hesaplanmıştır. Tüm ölçüm değerleri \bar{x} kontrol grafikleri üzerinde işaretlenmiştir. Şekil 3'deki noktalar incelendiğinde, ölçümlerin kontrol sınırı içerisinde kaldığı görülmektedir. Antalya bej örneğine ait \bar{x} kontrol grafiği incelendiğinde 4. ile 15. örneklerin kontrol sınırlarına yaklaştıkları ve bu örneklerin ileriki süreçlerde kontrol dışına çıkabilme olasılıklarının olduğu söylenebilir (Şekil 4). \bar{x} kontrol grafiği sonucu olarak, kalınlık değerine ilişkin üretim sürecinin genel olarak kontrol altında olduğu gözlemlenmiştir. 25 örneklem değerinden hiçbirinin üst ve alt kontrol limitleri dışında olmadığı tespit edilmiştir.

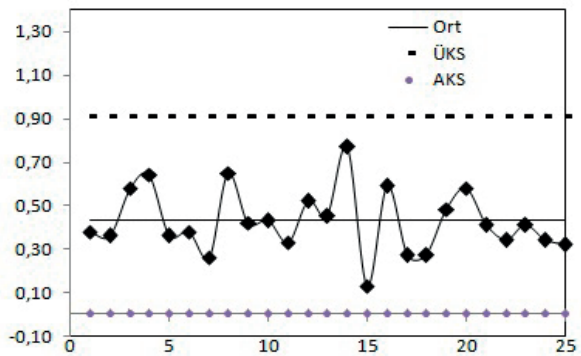
Şekil 3. Afyon Şeker ait \bar{x} kontrol grafiğiŞekil 4. Antalya Bej ait \bar{x} kontrol grafiği

Shewhart kontrol grafiği türünün değişim aralığı için hesaplanan kontrol grafiği Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Değişim aralığı (R) kontrol grafiklerinde dalgalanmaların yoğun olduğu

görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, Afyon Şekere ait 3. ve 14. örneklerin alt sınıra yaklaştığı görülmektedir (Şekil 5). Şekil 6 incelendiğinde, Antalya bej örneğinin 14 ile 15 örneklerinde değişim aralığı değeri yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kalınlık değişimindeki bu dalgalanmaların, doğal taşların silim hattındaki kalibrasyon kafalarındaki ayardan ya da doğal taşın bünyesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kalibrasyon aşamasındaki kalınlık değerindeki değişimin daha önceki çalışmalarda belirtildiği gibi, önceki kesim işlemleri sırasında oluşan derin çizik ve yarıkların tam olarak uzaklaştırılmaması, kayaç özelliklerinin ve mineralojik özelliklerinin etkili olduğu belirtilmiştir (Kulaksız 2007, Gürcan 2011). Ayrıca; bu fabrikada her bir doğal taş türü için farklı soket ve abrasiv kullanılmaktadır. Bu tür faktörlerin dalgalanmalara neden olmasına rağmen, kontrol sınırlarını aşan bir durum olmadığı ve Shewhart kontrol grafiği sonucu üretim sürecinin kontrol altında olduğu tespit edilmiştir.

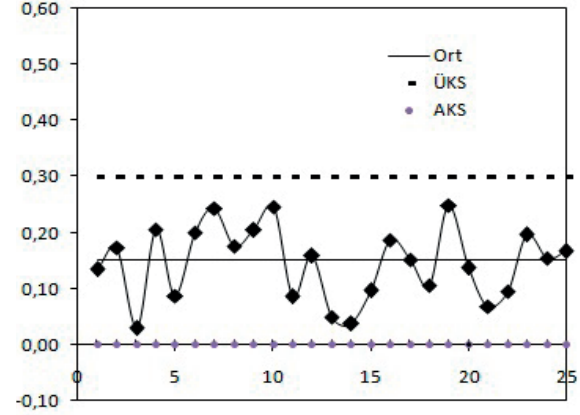


Şekil 5. Afyon şeker ait R kontrol grafiği

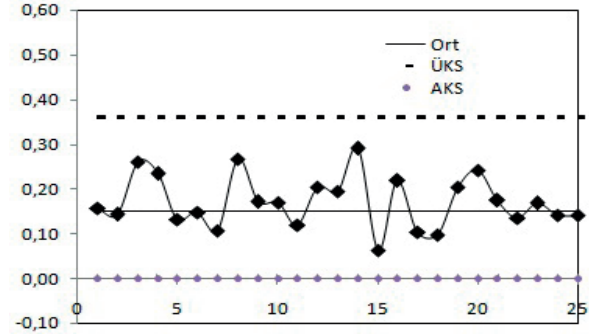


Şekil 6. Antalya bej ait R kontrol grafiği

Çalışmada kullanılan örneklerin standart sapma kontrol grafikleri incelendiğinde, değişim aralığı kontrol grafiklerindeki benzer şekilde dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Ancak, standart sapma kontrol grafiklerindeki örneklerde kontrol sınırlarını aşmadığı tespit edilmiştir (Şekil 7 – Şekil 8).



Şekil 7. Afyon şeker ait S kontrol grafiği



Şekil 8. Antalya bej ait S kontrol grafiği

Kalınlık değerlerine bağlı Shewhart standart sapma kontrol grafiklerine göre sürecin kontrol altında olduğu belirlenmiştir. Ancak Afyon Şeker ve Antalya Bej örneklerindeki ölçüm değerlerindeki aşırı dalgalanma mevcuttur. Bu nedenle parlatma hattındaki kalınlık ayarlaması tekrar gözden geçirilmeli ve ölçüm için tekrarlı çalışmalar yapılmalıdır. Çünkü Antalya Bej örneği sedimanter kökenli bir kayaç olmasından dolayı ve silim hattında yer alan kalibrasyon kafalarında kullanılan doğal taşın göre farklı soketlerin kullanılması kalınlık sapmalarına neden olmaktadır.

2.2. Parlaklık Değerine Bağlı Kontrol Grafiklerinin İncelenmesi

Doğal taşların parlatılmasında yüzey kalitesi oldukça önemlidir. Parlatma işleminde yüzeyinde gözle görülebilecek yüzey bozuklukları da abrasivlerin taş yüzeyine homojen olarak temasını engellemektedir. Ayrıca, oksilite asit ($C_2H_5O_2$) içeren cila taşları, kalsiyum karbonatla ($CaCO_3$) reaksiyona girerek taşın yüzeyinde parlak bir film tabakasının oluşmasını sağlamaktadır. Bu nedenle daha iyi bir cila için parlatma işleminin titizlikle yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, silim hattı sonrası plakaların parlaklık değerlerinden elde edilen ortalama (\bar{x}_i), standart sapma (S) ve değişim aralığı (R) Çizelge 3’de, kontrol sınır değerleri ise Çizelge 4’de verilmiştir. Çizelge 4’de ter alan kontrol sınırları hesaplanırlan Ek1’de verilen tablo yardımı ile $A_2:0,577$; $B_3:0$; $B_4:2,08$; $D_3:0$; $D_4:2,115$ olarak alınmıştır.

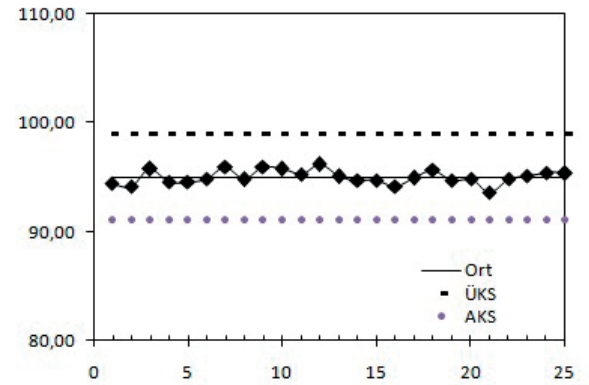
Çizelge 3. Parlaklık ölçümlerine (Gloss) ait ortalama \bar{x} , değişim aralığı R ve standart sapma S değerleri.

Afyon Şeker Örneği			Antalya Bej Örneği		
\bar{x}	R_i	S_i	\bar{x}	R_i	S_i
94,41	2,90	6,90	90,29	4,50	12,38
94,14	2,53	6,02	90,98	4,14	9,82
95,78	1,45	3,74	87,50	5,91	14,96
94,58	1,73	4,28	89,88	4,76	13,20
94,54	2,09	5,20	89,56	4,43	12,30
94,82	1,63	3,76	85,50	9,66	19,16
95,95	3,03	7,32	86,84	7,93	19,84
94,78	2,97	7,80	89,78	3,81	9,80
95,92	1,97	5,04	87,34	6,81	16,82
95,77	2,81	6,96	89,73	4,34	11,28
95,27	3,32	8,04	89,92	4,35	9,70
96,16	2,73	6,90	89,76	2,60	6,08
95,07	3,44	8,94	90,50	3,49	7,24
94,74	3,52	8,66	90,64	4,46	10,92
94,76	3,86	9,90	90,67	2,20	4,24
94,15	3,61	8,72	89,34	3,77	10,39
94,94	3,55	9,04	89,58	4,06	9,92
95,65	1,89	4,50	89,64	2,59	6,84
94,69	4,48	9,36	86,72	9,27	24,58
94,84	2,34	5,90	90,79	6,33	13,64
93,64	3,05	7,72	91,07	3,65	9,24
94,88	3,36	8,02	91,90	2,87	7,02
95,16	2,43	6,30	91,76	3,67	8,10
95,44	3,04	7,58	90,11	4,96	11,92
95,33	2,37	5,74	90,54	3,30	8,02

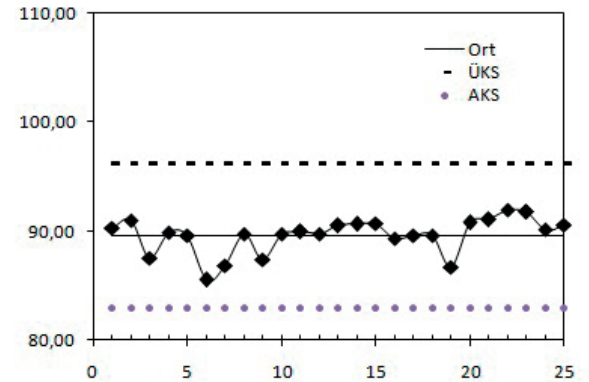
Shewhart kontrol grafiğine göre hesaplanan parlaklık değerlerine ait \bar{x} kontrol grafikleri incelendiğinde, ölçümlerin kontrol sınırı içerisinde kaldığı görülmektedir. Antalya bej örneğine ait x kontrol grafiğinde orta çizgiden sapmaların daha fazla olduğu gözlemlense de üretim sisteminde kontrol dışı bir durumun gerçekleşmediği tespit edilmiştir (Şekil 9-Şekil 10).

Çizelge 4. Parlaklığa ait kontrol grafiği sınır değerleri.

	Kontrol Sınırı	\bar{x}_i	R_i	S_i
Afyon Şeker	ÜKS	99,00	14,57	5,86
	OÇ	95,02	6,89	2,80
	AKS	91,04	0,00	0,00
Antalya Bej	ÜKS	96,25	24,31	9,85
	OÇ	89,61	11,50	4,71
	AKS	82,97	0,00	0,00

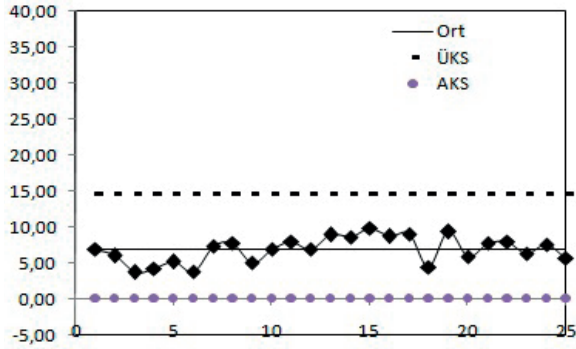


Şekil 9. Afyon şeker ait \bar{x} kontrol grafiği (Parlaklık)

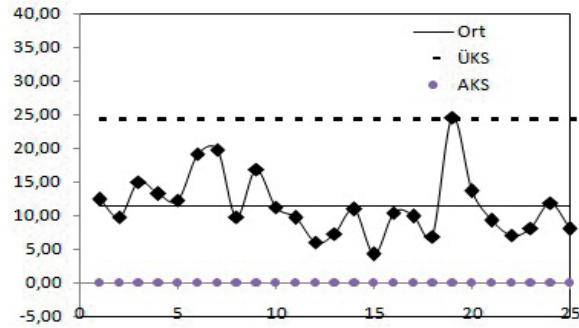


Şekil 10. Antalya bej ait \bar{x} kontrol grafiği (Parlaklık).

Shewart kontrol grafiği türünün değişim aralığı (R) kontrol grafiklerinde, \bar{x} ortalama grafiklerine görece daha fazla dalgalanmanın olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmanın özellikle Antalya Bej örneklemesine ait 6. ve 7. örnek ile 18. ve 19. örneklerde değişim aralığı değerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu noktalardan 19 üst kontrol sınırını aşmıştır. Bu yüzden sürecin kontrolden çıkmasına neden olmaktadır (Şekil 11 ve Şekil 12).

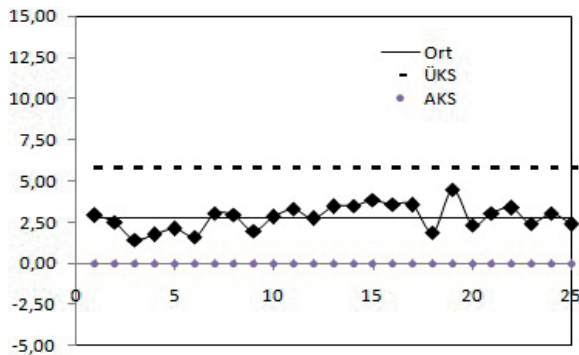


Şekil 11. Afyon şeker ait R kontrol grafiği (Parlaklık)



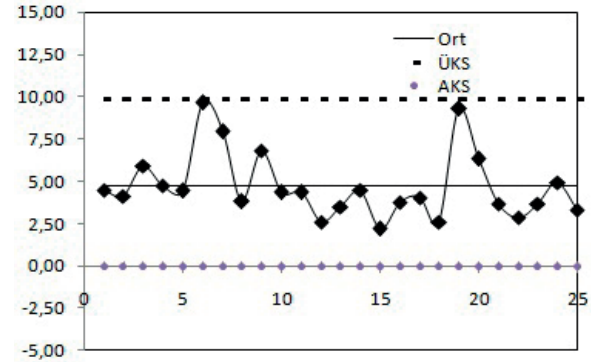
Şekil 12. Antalya bej ait R kontrol grafiği (Parlaklık)

Parlaklığa ait standart sapma kontrol grafiği üzerinde işaretlenen ölçüm değerlerine dayanarak sürecin kontrol altında olduğu görülmektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Afyon şeker ait S kontrol grafiği (Parlaklık)

Şekil 14'te parlaklığa ait standart sapma ölçüm değerleri grafik üzerinde işaretlenmiş ve bu değerlere göre sürecin kontrol altında olmadığı görülmüştür. Grafik üzerinde 6. ve 19. noktaların dışındaki tüm noktalar kontrol sınırları içerisinde yer almaktadır. Üst kontrol sınırı ile aynı noktada bulunan 6. ve 19. noktalar ise sürecin kontrolden çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 14. Antalya bej ait S kontrol grafiği (Parlaklık)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türk doğal taş sektöründe artan ihracatın sürekliliğinin sağlanması için doğal taş işletmelerinin gerek ulusal gerekse uluslararası alanlarda yüksek rekabet yarışında yer almaları ile gerçekleşecektir. Bu yüzden, mevcut pazarları korumak ve geliştirmenin en sağlıklı yolu hammadde kalitesinin yanı sıra; fabrika üretim kontrollerinin yapılması ile sağlanacaktır. Günümüz koşullarında doğal taş işletmeleri varlıklarını ve karlılıklarını sürdürebilmek ve rekabet avantajı sağlayabilmek için kalite konusuna gereken önemi vermek zorundadırlar. Böylece, kaliteyi etkin ve verimli kullanarak gelişimlerini sürdürebileceklerdir.

Shewart kontrol grafiklerine göre, ortalama kontrol grafiğinin kontrol altında olması kalite özelliği açısından oldukça önemlidir. Ancak, bununla birlikte uygulamada çoğu kez standart sapma veya değişim aralığı kontrol grafiğine de ihtiyaç duyulur. Çünkü üretimde hem kararlılık hem de değişim durumunun kontrol altında olması gerekir (Başar ve Oktay 1999). Bu çalışmada, Shewart ortalama kontrol grafiklerinden elde edilen bulgulara göre üretim süreci, parlatma

sonrası kalınlık ve parlaklık değerleri bakımından bazı dalgalanmalara rağmen kontrol altındadır.

Shewhart kontrol değişim grafiği iki farklı doğal taş örneği dikkate alınarak incelenmiştir. Tüm örnek gruplarında değerler kontrol sınırları içerisinde. Kalınlık değerlerine bağlı Shewhart standart sapma kontrol grafiklerinin değişim aralığı kontrol grafiklerindeki benzer bir şekilde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Ancak, standart sapma kontrol grafiklerindeki örneklerin kontrol sınırlarını aşmadığı tespit edilmiştir.

Parlaklık ölçüm değerlerine göre elde edilen kontrol grafikleri incelendiğinde, Antalya bej örneğinin değişim aralığı ve standart sapma kontrol grafiklerinde dalgalanmanın fazla olduğu ve sürecin kontrolden çıktığı görülmektedir. Antalya bej örneğinin parlatılması sırasında, silim hattındaki kalibrasyon kafalarında farklı soketler kullanılmıştır. Ayrıca, kayaç özelliklerine göre silim kafalarındaki abrasiv serisi de değiştirilmektedir. Antalya Bej örneği mikritik kökenli olup, yer yer silis katkılı ve kırık ve çatlak yapıya sahip bir kayadır. Bu yüzden kalite kontrol grafiklerinde dalgalanma fazla olmuştur. Bu tür değişimler heterojen bir yapıda olan doğal taşlar için tolere edilebilse de, süreçteki aksamalar (vardiya değişimi, makine arıza ve bakım süreçleri vb.) not edilmeli ve daha sonraki süreç kontrolüne bilgiler sunması sağlanmalıdır.

Her ne kadar çalışmada kullanılan doğal taşlar farklı kökene sahip olması ve dokusal farklılıklar nedeni ile belirli bir değişim beklenmesine rağmen, bu işletme için özellikle silim hattı üretim aşamasının kontrol edebildiği ve bazı dalgalanmalara rağmen etkili bir şekilde uygulandığı anlaşılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler sonucunda kalınlık ve parlaklık değerinde görülen bu dalgalanmaların, üretim aşamasındaki kalibre, parlatma-cila işlemi, abrasiv türü, bant hızı gibi parametrelerdeki değişimler sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir. Ayrıca, doğal taş örneklerinin fiziksel ve mineralojik özelliklerinden dolayı farklılıklar sergilemesi doğal karşılanmaktadır. Bu yüzden, doğal taş işletmelerinde üretimin başlangıcından nihai ürün eldesine kadar ki geçen süredeki her aşamada kalite kontrol grafikleri hazırlanarak, hataların nereden kaynaklandığının tespitinin yapılması üretim ve nihai ürünün kaliteli olmasını sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmada kullanılan doğal taş örneklerini sağlayan ÜMİT Mermer firmasına katkılarından dolayı teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Akçakoca, H., Kaya, S. ve Ören Ö., 2006. Mermer-Traverten Fabrikalarında Ürün Kalitesinde Oluşan Problemler. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11, 132-140.

Akçil, A., 2014. Shewart, Cusum Ve Ewma Kontrol Grafiklerinin Bir Üretim İşletmesinde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli, 141.

Akkoyun, Ö., 2006. Kalite Kontrol Grafikleri Oluşturmak İçin Bir Bilgisayar Yazılımının Geliştirilmesi ve Mermer Sektöründe Denenmesi. Geosound Yer Bilimleri Dergisi, 48-49.

Ala, D.M., ve İkiz, Y. 2015. Dokuma Üretimi Süresince Oluşan Kumaş Hatalarının Belirlenmesine Yönelik İstatistiksel Bir Araştırma. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(7), 282-287.

Ankara, H., Yerel, S., 2008. Use of Range Control Charts in Determination of Variability in Surface Parallelisms of Plates. Journal of Scientific&Industrial Research. 67, 1078-1082.

Ankara, H., Yersel S., Ersoy, A. H., Konuk A., ve Yavuz, M., 2006. Diskli Blok Kesme Makinalarındaki Kayıpların Shewhart Kontrol Grafikleri ile Belirlenmesi. Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, 421-430.

Ayhan, F., 2007. ISO 9000 Kalite Güvence Sistemi ve Bir Alan Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Malatya, 155.

Başar, A., Oktay, E. 1999. Üretimde Kalite Kontrolü. 12. Bölüm. Uygulamalı İstatistik 1, 2., Aktif Yayınevi, Erzurum.

Başaran, N., 2010. Kalite İyileştirmede İstatistiksel Proses Kontrol Tekniklerinden Pareto Analizi ve Gıda Sektöründe Bir Uygulama. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, 76.

- Burliskowska, M.D., 2005. Quality Estimation Of Process With Usage Control Charts Type X-R And Quality Capability of Process Cp, Cpk. Journal of Materials Processing Technology, 162-163, 736-743.
- Burnak N., 1997. Toplam Kalite Yönetimi İstatistiksel Süreç Kontrolü. Osmangazi Üniversitesi Yayını, 222.
- Çakırkaya M., Acar Ö. E., 2016. Bir Üretim Hattında Meydana Gelen Hataların Önem Derecelerinin İstatistiksel Proses Kontrol Tekniklerinden Pareto Analizi ile Belirlenmesi. Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 13(36), 272-288.
- Demir, Y., Mirtağoğlu, H., 2016. Shewhart CUSUM ve EWMA Kontrol Grafiklerinin Makine Sanayine Uygulanması. YYÜ TAR BİL DERG (YYU J AGR SCI). 26(2): 254- 265.
- Eveli S., Behdioğlu S., 2006. İstatistiksel Proses Kontrolü Teknikleri İle Kömür Kalitesindeki Değişkenliğin Belirlenmesi. Madencilik, 4(3), 19-26.
- Gürcan, S., 2011. Metamorfik Kökenli Mermerlerin Parlatılmasında Mineralojik ve Petrografik Özelliklerin Etkisi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Gürcan, S., 2012. Doğaltaş Standartlarındaki Fabrika Üretim Kontrol Sürecinin İncelenmesi. 8. Ulusal Mermer Ve Doğaltaş Kongresi, Ed: B. Ersoy, A. Sarıışık, E. Özkan, G. Sarıışık, İ.C. Engin ve G.E. Güraksın , 559-564.
- Ledolter, J. Burrill, C.V., 1999. Statistical Quality Control Strategies and Tools for Continual Improvement. John Wiley & Sons. New York. 544.
- Kan, B., 2005. Verilerin Normal Dağılıma Sahip Olmaması Durumunda Kontrol Grafiklerinin Oluşturulması. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir. 105.
- Kartal M (1999). İstatistiksel Kalite Kontrolü. Şafak Yayınevi, Sivas.
- Kulaksız, S. 2007. Doğaltaş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşletme Teknolojileri. TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını. Ankara, 634 sf.
- Montgomery, D.C., 2005. Introduction To Statistical Quality Control. Fifth Edition, John Wiley And Sons Inc., United States of America, 392.
- Nazlı İ., 2014. Ebatlanmış Doğaltaşlarda Kalite Kontrol Grafiklerinin Oluşturulması. Bitirme Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, 75.
- Özdemir, T., 2000. İstatistiksel Kalite Kontrol. A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara, 300 sf.
- Paliska, G., Pavletic, D. And Sokovic, M., 2007. Quality Tools – Systematic Use In Process Industry. Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering, 25, (1), 79-82.
- Saraç, S., ve Özdemir, G., 2003. Mermer Fayanslarının Boyutlandırılmasında İstatistiksel Kalite Kontrolü. 4. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu, Ed: M. Ersoy, 26 sf.
- Şentürk, S., 2002. Niceliksel Kalite Kontrol Grafiklerinin Varsayımlarının Sınanması ve Bir Uygulama. Basılmamış Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 99.
- Topalidou, E. and Stelios, P. 2009. Review of Multinomial and Multiattribute Quality Control Charts. Quality And Reliability Engineering International, Volume: 25, 773 – 804.
- Trietsch, D. 1999. Statistical Quality Control - A Loss Minimization Approach, Series On Applied Mathematics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Volume 10, Singapore.
- Vapur H. Bayat, O., Akyol F., 2005. Eti Gümüş A.Ş. Liç Prosesinde İstatistiksel Proses Kontrolü Uygulanması. Türkiye 19 Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, 347-355.
- Yıldırım, H., Karaca, E., 2013. Üretim Sürecinde İstatistiksel Proses Kontrol (İPK) Uygulamaları ve Elektronik Sektöründe Bir İnceleme. Öneri Dergisi, 10 (39), 77-87.
- Zeyveli, M., 2010. AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliğinin İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması ve İstatistiksel Proses Kontrol Metodunun Uygulanması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26 (4), 379-386.

Ek 1: Kalite Kontrol Grafikleri Değişkenlikleri Çiziminde Kullanılan Faktörler (Burnak 1997)

n	A	A ₂	A ₃	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	C ₄	d ₂
2	2,121	1,880	2,659	0,000	3,267	0,000	2,606	0,000	3,686	0,000	3,267	0,798	1,128
3	1,732	1,023	1,194	0,000	2,568	0,000	2,276	0,000	4,358	0,000	2,575	0,8862	1,693
4	1,500	0,729	1,628	0,000	2,266	0,000	2,088	0,000	4,698	0,000	2,282	0,9213	2,059
5	1,342	0,577	1,427	0,000	2,089	0,000	1,964	0,000	4,918	0,000	2,115	0,9400	2,326
6	1,225	0,483	1,287	0,030	1,970	0,029	1,874	0,000	5,078	0,000	2,004	0,9515	2,534
7	1,134	0,419	1,187	0,118	1,882	0,113	1,806	0,204	5,204	0,076	1,924	0,9594	2,704
8	1,061	0,373	1,099	0,185	1,815	0,179	1,751	0,388	5,306	0,136	1,864	0,9650	2,847
9	1,000	0,337	1,032	0,239	1,761	0,232	1,707	0,547	5,393	0,184	1,816	0,9693	2,970
10	0,949	0,308	0,975	0,284	1,716	0,276	1,669	0,687	5,469	0,223	1,777	0,9727	3,078
11	0,905	0,285	0,927	0,321	1,679	0,313	1,637	0,811	5,535	0,256	1,744	0,9754	3,173
12	0,866	0,266	0,886	0,354	1,646	0,346	1,610	0,922	5,594	0,283	1,717	0,9776	3,258
13	0,832	0,249	0,850	0,382	1,618	0,374	1,585	1,025	5,647	0,307	1,693	0,9794	3,336
14	0,802	0,235	0,817	0,406	1,594	0,399	1,563	1,118	5,696	0,328	1,672	0,9810	3,407
15	0,775	0,223	0,789	0,428	1,572	0,421	1,544	1,203	5,741	0,347	1,653	0,9823	3,472
16	0,750	0,212	0,763	0,448	1,552	0,440	1,526	1,282	5,782	0,363	1,637	0,9835	3,532
17	0,728	0,203	0,739	0,466	1,534	0,458	1,511	1,356	5,820	0,378	1,622	0,9845	3,588
18	0,707	0,194	0,718	0,482	1,518	0,475	1,496	1,424	5,856	0,391	1,608	0,9854	3,640
19	0,688	0,187	0,698	0,497	1,503	0,490	1,483	1,487	5,891	0,403	1,597	0,9862	3,689
20	0,671	0,180	0,680	0,510	1,490	0,504	1,470	1,549	5,921	0,415	1,585	0,9869	3,735
21	0,655	0,173	0,663	0,523	1,477	0,516	1,459	1,605	5,951	0,425	1,575	0,9876	3,778
22	0,640	0,167	0,647	0,534	1,466	0,528	1,448	1,659	5,979	0,434	1,566	0,9882	3,819
23	0,626	0,162	0,633	0,545	1,455	0,539	1,438	1,710	6,006	0,443	1,557	0,9887	3,858
24	0,612	0,157	0,619	0,555	1,445	0,549	1,429	1,759	6,031	0,451	1,548	0,9892	3,895
25	0,600	0,153	0,606	0,565	1,435	0,559	1,420	1,806	6,056	0,459	1,541	0,9896	3,931



Orijinal Araştırma / Original Research

DİK MİLLİ DARBELİ KIRICILARDA ROTOR HIZI BOYUT KÜÇÜLTME İLİŞKİSİ

ROTOR SPEED - SIZE REDUCTION RELATIONSHIP IN A VERTICAL SHAFT IMPACT CRUSHER

Hakan Dünder^{a,*}

^a Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

Geliş Tarihi / Received : 26 Aralık / December 2017

Kabul Tarihi / Accepted : 01 Mayıs / May 2018

Anahtar Sözcükler:

Dik milli darbeli kırıcı,
Rotor hızı,
Boyut küçültme,
Enerji tüketimi.

Keywords:

Vertical shaft impact crusher,
Rotor speed,
Size reduction,
Energy consumption.

ÖZ

Dik milli darbeli kırıcılar (VSI), agrega üretimi başta olmak üzere, dünya genelinde madencilikte geniş bir uygulama alanına sahiptir. Üçüncül ve dördüncül kırma aşamalarında kendine yer bulan dik milli darbeli kırıcı, nispeten kübik şekilli ürün vermesiyle agrega üretiminde, ince üretimi sebebiyle de madencilikte ön plana çıkmaktadır. Dik milli kırıcıda taneler yüksek hızda dönen rotor vasıtasıyla kırıcı duvarlarına doğru fırlatılmakta ve darbe altında kırılmaktadır. Ayarlanabilen rotor hızı sayesinde farklı enerji seviyelerinde kırma işlemi gerçekleştirilerek farklı inceliklerde ürün elde edilebilmektedir. Bu çalışma kapsamında farklı rotor hızlarındaki kırıcı performansı boyut küçültme ve enerji tüketimi açısından değerlendirilmiş olup ürün tane şekli yönünden herhangi bir değerlendirmede bulunulmamıştır. Sonuçlar artan rotor hızına bağlı olarak ürünün incelendiğini, kapasitenin de optimize edilerek enerji tüketimi açısından daha verimli bir operasyonel koşulun sağlanabileceğini göstermiştir.

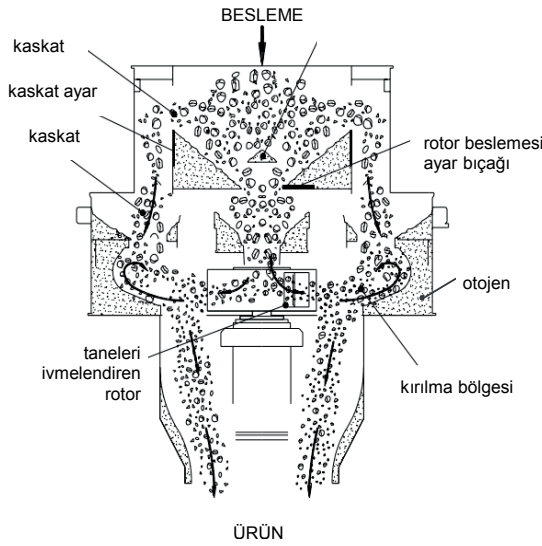
ABSTRACT

Vertical shaft impact crushers (VSI), mainly used in aggregate production, are operated in mining industry widespread in the world. The VSI, which is used as a tertiary or quaternary crusher, is very well known in aggregate industry by its production of cubical particles and in mining industry by its fines generation. The particles fed into the crusher is accelerated by means of the rotor and directed to the walls of the crusher where a high velocity impact breakage occurs. The adjustable rotor speed allows to crush the material from different energy levels to obtain different product finenesses. In this study the size reduction performance of the crusher was assessed with respect to rotor tip speed rather than particle shape. Results showed that the product gets finer as the rotor tip speed increases and the optimum operating condition can be achieved by adjusting the capacity of the crusher.

* Sorumlu yazar: hdundar@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0001-5279-4728>

GİRİŞ

Düşük operasyonel maliyet ile ince kırma fikrinin bir sonucu olarak ortaya çıkan dik milli kırıcı, ilk olarak 1960'ların sonlarına doğru Yeni Zelanda'da tasarlanmıştır (Rodriguez, 1990). Özellikle agrega üretiminde, konik kırıcıya kıyasla, kübik şekilli ürün vermesi önemli bir rol oynarken, ince üretimi daha fazladır (Bengtsson ve Evertsson, 2006; 2008, Lindqvist, 2008). Tasarımı itibariyle, dağıtıcı bir rotor ve kırma haznesinden oluşan dik milli kırıcı tanelerin yüksek hızlarda birbirine ve kırıcı duvarına çarpmasını sağlayarak boyut küçültme işlemini gerçekleştirmektedir. Konvansiyonel kırıcılardaki gibi ayarlanabilen bir ağız açıklığı olmadığından, dik milli kırıcılarda incelik ayarı rotor hızı ile yapılmaktadır. Şekil 1'de dik milli kırıcıdaki malzeme hareketini gösterir basit bir çizim verilmektedir.

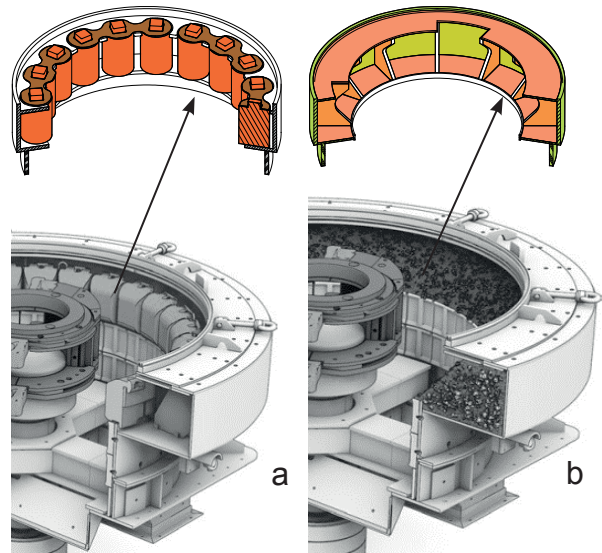


Şekil 1. Dik milli kırıcıdaki malzeme hareketi ve kırma işlemi (Metso Kılavuz)

Şekil 1'den görüleceği üzere kırıcıya beslenen malzemenin bir kısmı doğrudan kırıcı rotora giderken, bir kısmı da yukarıdan taşma sonucu (kaskat akışı) kırma bölgesine yönlendirilmektedir. Yüksek hızlarda rotoru terk eden malzeme kırma bölgesinde, kaskat akışıyla gelen taneler ile çarpışmakta ve taneler arasındaki enerji transferine bağlı olarak boyut küçültme işlemi gerçekleşmektedir. Rotoru terk eden taneler ile

kaskat akışıyla birlikte gelen tanelerin çarpışması sonucu kırma bölgesinde bir tane bulutu ortaya çıkmaktadır. Yüksek hızdaki çarpışmalara bağlı olarak bu tane bulutu kırma bölgesini hemen terk etmemekte ve işlem sırasında tekrarlı kırma gerçekleşmektedir. Artan kaskat akışa bağlı olarak tane bulutu içerisindeki tane miktarı artmakta ve enerji transfer verimi buna bağlı olarak iyileşmektedir. Öte yandan artan kaskat akışı iri boyutta ürün elde edilmesine ve kapasitede artışa sebep olmaktadır. Kaskat akış miktarını düzenlemek amacıyla ayarlanabilir bıçaklar bulunmaktadır. Ayrıca rotora giden malzeme miktarı da kontrol edilebilmektedir.

Yüksek hızlarda gerçekleşen kırma işlemi neticesinde rotorda ve kırıcı duvarlarında yüksek oranda aşınmaların ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu aşınmaların önüne geçebilmek amacıyla farklı rotor ve kırma haznesi tasarımları geliştirilmiştir. Üretici firmaya bağlı olarak farklı tasarımları olsa da başlıca iki tip kırıcı duvarı uygulanmaktadır (Şekil 2). Şekil 2 b'de görülen malzeme kutusu tasarımında taneler haznelerde birikerek otojen bir kırıcı duvarı ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede tanelerin malzeme yatağı üzerinde kırılması sağlanmaktadır. Böylece, çelik astar (Şekil 2a) uygulamalarına kıyasla aşınma maliyetleri düşmektedir.



Şekil 2. Kırıcı duvarında kullanılan astar tipleri a: çelik astar b: malzeme kutusu (stone box) (BHS Broşür)

Bu çalışma kapsamında Metso Barmac[®] B6150 ve B7150 serisi dik milli kırıcıların rotor hızına bağlı boyut küçültme performansları incelenmiş olup ürün şekli ile ilgili bir değerlendirme yapılmamıştır.

1. TESİS ÇALIŞMALARI

Metso Minerals'in Yeni Zelanda Matamata'da Whitehall Agregası tesisinde kurulu, endüstriyel ölçekteki Barmac[®] B6150 ve B7150 serisi dik milli kırıcılar kullanılarak testler yapılmıştır. Çizelge 1'de kırıcılara ait teknik özellikler verilmektedir. Test çalışmaları sırasında Yeni Zelanda'nın pek çok bölgesinde bulunan ve oldukça sert bir kayaç olan kumtaşı sınıfındaki "greywacke" kullanılmıştır.

Çizelge 1. Kırıcı teknik özellikleri

	B6150	B7150
Maks. besleme boyu (mm)	37	45
Rotor çapı (mm)	560	700
Rotor devri (rpm)	1500-2500	1100-2000
Motor gücü (kW)	185	260

Normal şartlarda eleklerle kapalı devre çalıştırılan kırıcılar test çalışmalarında açık devre çalıştırılarak farklı çalışma koşullarında besleme ve ürün numuneleri alınmıştır. Test çalışmalarında rotor hızı başlıca değişken olmakla birlikte sabit rotor hızında farklı tonajlar da denenmiştir. Çizelge 2'de test planı yer almaktadır.

Çizelge 2. Test planı

Rotor hızı (m/s)	B6150 (t/h)	B7150 (t/h)
45	95	182
55	60, 95, 130	182
65	95	182

Testler sırasında malzeme kutusu olarak nitelendirilen otojen astar kullanılmış olup, rotor hızının doğrudan etkisinin görülmesi amacıyla kaskat akışa izin verilmemiştir. Testler esnasında kırıcıların stabil çalıştığı kumanda odasında güç tüketimleri ve tonajları takip edilerek değerlendirilmiş olup, ani duruş verilmiştir. Ani duruşla birlikte besleme ve ürün bantlarından numuneler alınmıştır. Şekil 3'te kırıcılara ait genel görünüm ile numune alma noktalarına ait fotoğraflar yer almaktadır. Yanyana konumlandırılmış olan kırıcılar yatayda dairesel hareket eden tek bir besleme bandı vasıtasıyla beslenebilmektedir.

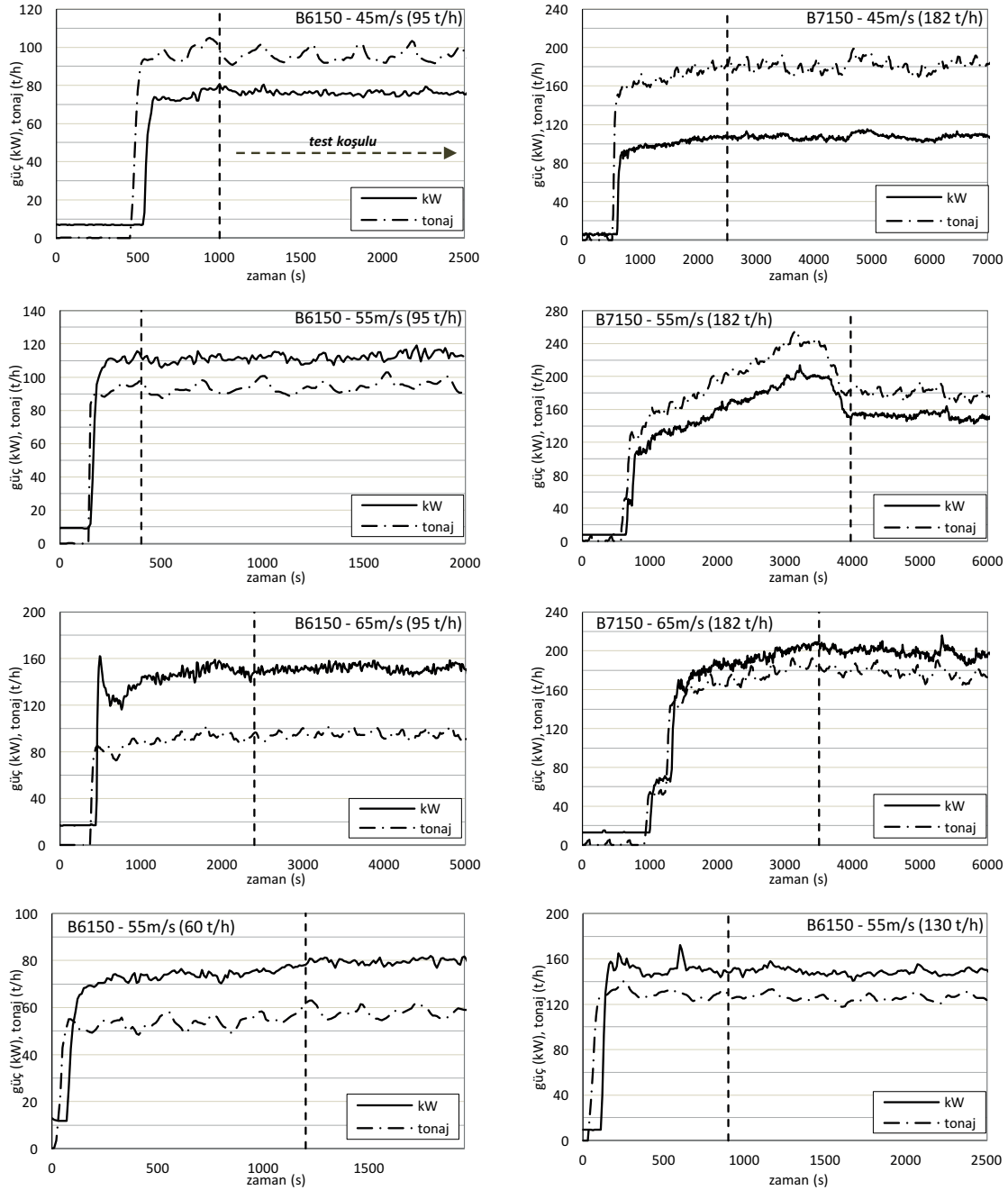


Şekil 3. a: B6150 operasyonu
b: B7150 operasyonu
c: kırıcı beslemesi numune alma noktası
d: kırıcı ürünü numune alma noktası

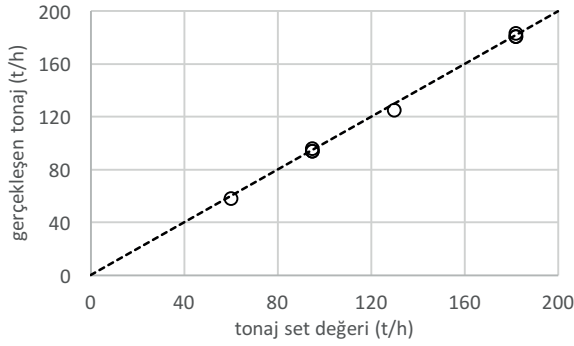
Kumanda odasında kaydedilen güç ve tonaj değerlerinin zamana bağlı değişimi farklı testler için Şekil 4'te yer almaktadır. Kırıcıların stabil çalışmaya başladığı belirlendikten sonra belirli bir süre beklenerek ani duruş verilmiştir. Şekil 4'teki eğilimler incelendiğinde güç ve tonaj değerlerinin ani duruştan önce stabil olduğu görülmektedir.

Çizelge 2'de yer alan tonaj değerleri test çalışmaları öncesinde belirlenen ve set edilen değerlerdir.

Operasyon sırasında anlık ölçülen ve kumanda odasına aktarılan tonaj değerleri dikkate alınarak test sırasında gerçekleşen tonaj değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5'te gerçekleşen ve set edilen tonaj değerleri verilmektedir. Gerçekleşen tonaj değerlerinin set değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Sonraki bölümlerde yapılan değerlendirmelerde gerçekleşen tonaj değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4. Kumanda odası verileri

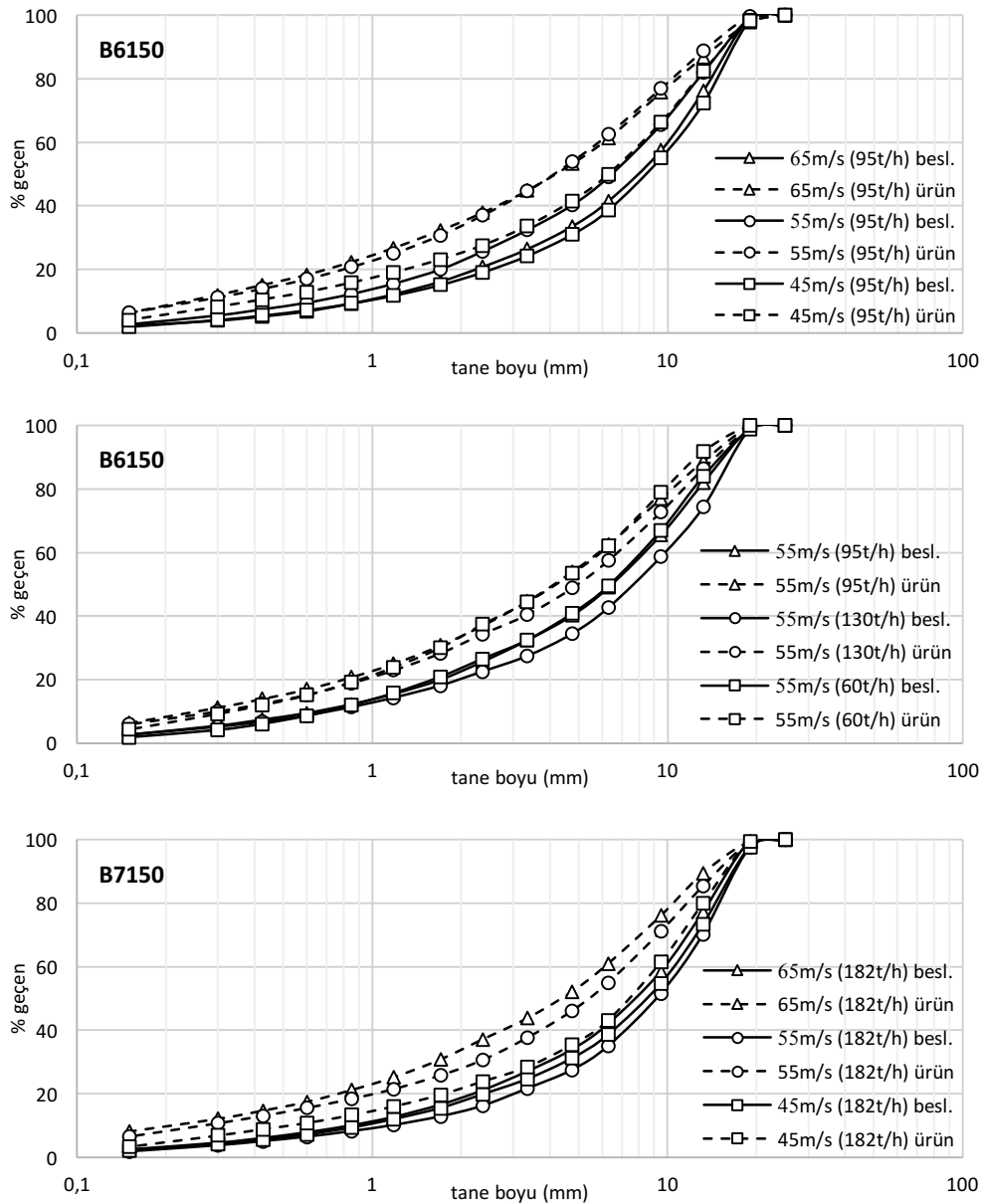


Şekil 5. Set tonaj değerleri ile gerçekleşen tonaj değerleri

2. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Test çalışmaları sonrasında, alınan numunelerin boyut dağılımları belirlenmiştir. Şekil 6'da iki farklı kırıcıda farklı test koşullarında elde edilen besleme ve ürün boyut dağılımları verilmektedir. Test çalışmalarında kırıcılara beslenen malzemenin üst boyu yaklaşık 25 mm'dir.

Kırıcı testleri sırasında kaydedilen güç tüketimleri göz önünde bulundurularak, kırıcıların rotor hızına bağlı boyut küçültme performansları değerlendirilmiştir. Kırıcıların boyut küçültme performansları indirgeme oranları ve ince



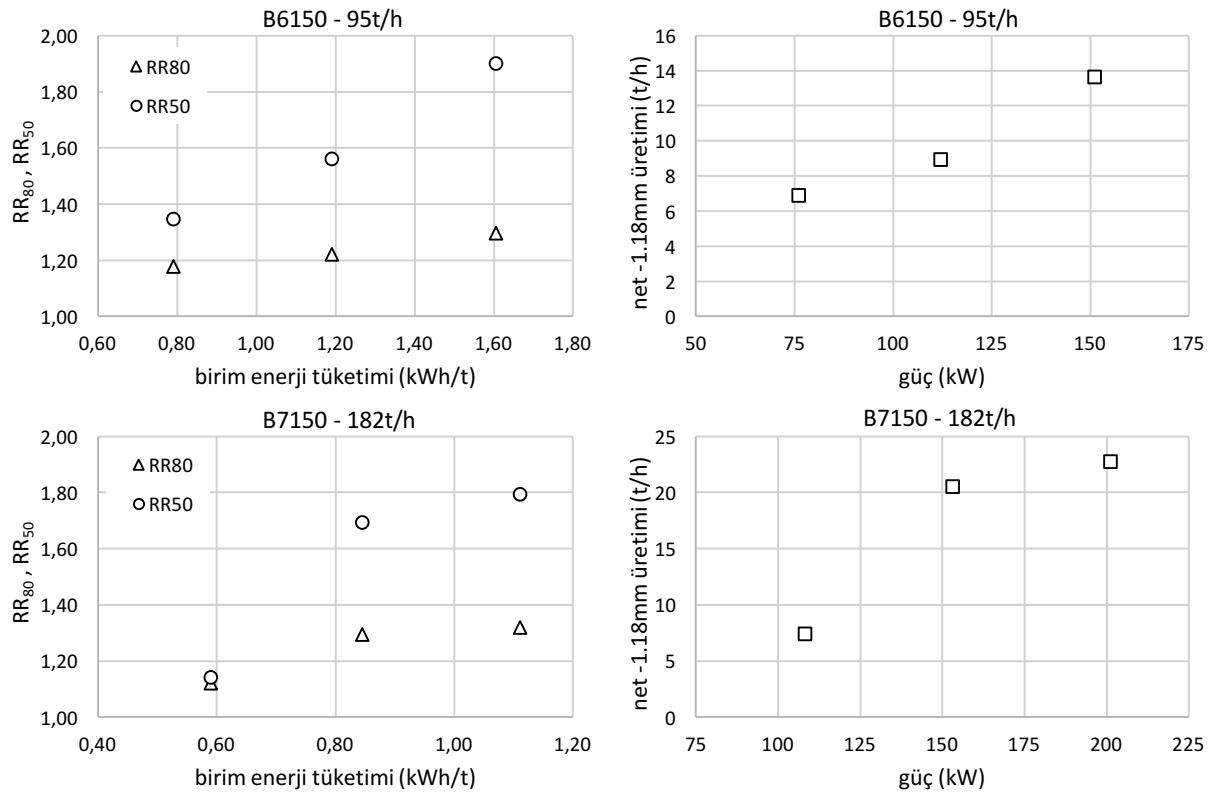
Şekil 6. Kırıcı beslemesi ve ürünü boyut dağılımları

üretimleri üzerinden değerlendirilmiştir. Bu kapsamda RR80, RR50 parametreleri ile net -1.18mm üretimi baz alınmıştır. RR80 ve RR50, besleme ve ürünün, sırasıyla, %80 ve %50'sinin geçtiği boyların oranı, -1.18mm net üretimi ise ilgili boyun üründeki miktarının beslemedeki miktardan farkıdır.

Şekil 7'de sabit tonaj değerlerinde farklı rotor hızlarında ortaya çıkan güç tüketimine bağlı boyut küçültme ilişkileri verilmektedir. Her iki kırıcıda da artan rotor hızına bağlı olarak boyut küçültme performansının arttığı, özellikle ince boylardaki indirgeme oranındaki artış hızının iri boylardakine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. İnce üretimi yönünden incelendiğinde ise artan enerjiye bağlı olarak 1.18mm'den küçük tanelerin üretim hızının arttığı görülmektedir. Sadece

1.18mm için değerlendirme yapılmış olmasına rağmen daha ince boylarda da aynı durumun söz konusu olduğu görülmüştür.

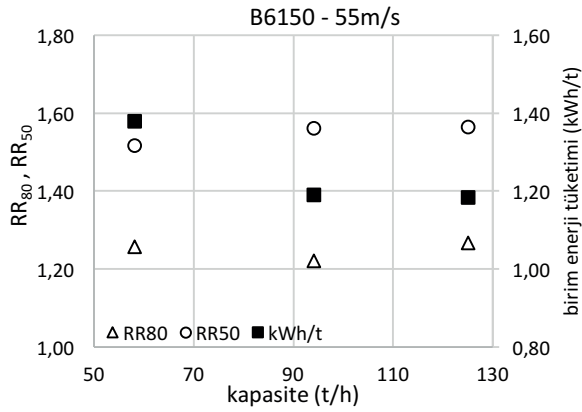
Dik milli darbeli kırıcılarda ürün inceliği rotor hızı ile ayarlanmakta olup, kapasitenin ise verimli kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda sabit rotor hızında farklı kapasitelerde B6150 tipi kırıcıda ilave bir çalışma yapılmıştır. Şekil 8'de kapasitenin kırıcı indirgeme oranı ve birim enerji tüketimine etkisi verilmektedir. İndirgeme oranları incelendiğinde, çalışmanın yapıldığı tonaj aralığında, kapasitenin boyut küçültme üzerinde etkili olmadığı nitekim artan kapasiteye bağlı olarak azalan birim enerji tüketimi dikkate alındığında limitler dahilinde yüksek kapasitelerde çalışmanın verimlilik açısından önemli olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Farklı rotor hızlarında enerji-boyut küçültme ilişkisi

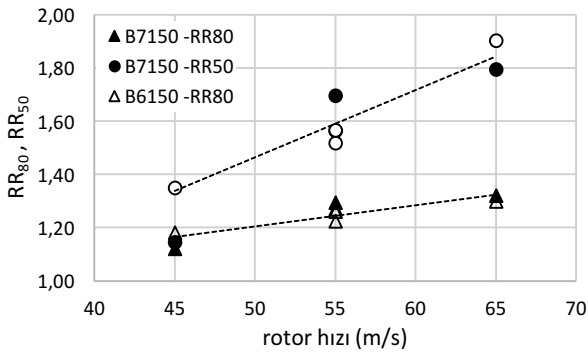
Dik milli kırıcının boyut küçültme performansı; rotor çapına ve hızına, kırma haznesi tasarımına ve kaskat miktarına bağlı olarak değişmekle birlikte, kırma işlemi için tane üzerine etkiyen kuvvet rotor çapı ve açılal hızın karesi ile doğru

orantılıdır (Nikolov, 2004). Bu noktadan hareketle, rotor ebatları farklı olan iki kırıcının boyut küçültme performansları ayrıca karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma birim enerji tüketimleri yerine rotor çizgisel hızları dikkate alınarak yapılmıştır.

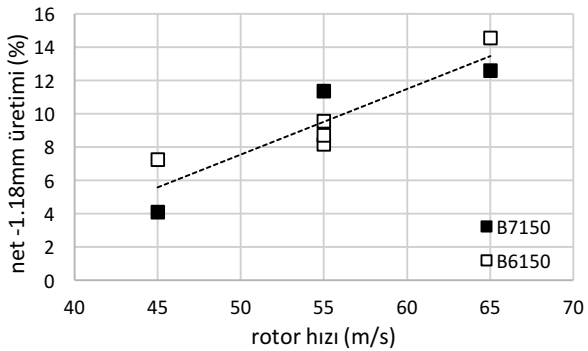


Şekil 8. Farklı tonaj değerlerinde indirgeme oranı ve birim enerji tüketimi

Rotor çapı ve açısal hızın bir sonucu olarak ortaya çıkan çizgisel hız taneye etkiyen kuvvetin bir göstergesidir. Şekil 9 ve 10'da, bu çalışma kapsamında elde edilen tüm verilerin yer aldığı, rotor çizgisel hızına bağlı indirgeme oranları ve oransal bazda ince üretimi sırasıyla yer almaktadır.



Şekil 9. Rotor hızı-indirgeme oranı ilişkisi



Şekil 10. Rotor hızı-ince üretimi ilişkisi

Şekil 9 ve 10 incelendiğinde, indirgeme oranı ve ince üretiminin rotor hızına bağlı olarak belirli bir bandta salındığı ve rotor hızı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu bandın, özellikle Şekil 8 üzerinden tartışılan kapasite optimizasyonu ile daralacağı öngörülmektedir. B7150'de 45m/s'lik rotor hızında RR50 değerinde bir sapma görülmektedir, bu durumun deneysel bir hata olduğu düşünülmektedir.

YORUM

Bu çalışma kapsamında, dik milli kırıcıda rotor hızının boyut küçültme üzerine etkisi incelenmiş olup, çalışma sırasında boyut küçültmeye etkisi olan kırıcı kaskat akışları sıfırlanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında, artan rotor hızına bağlı olarak taneye etki eden kuvvetin artması sonucunda taneler daha yüksek enerji seviyesinden kırılmakta ve daha ince ürün elde edilmektedir. Taneye etki eden kuvvetin çizgisel hızın bir fonksiyonu olduğu bilinmektedir, buna paralel olarak kurulu motor gücü ve rotor çapı farklı olan kırıcıların boyut küçültme performansının aynı rotor çizgisel hızında birbirine yakın olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Yazar, bu çalışmayı destekleyen Metso Minerals'e ve katkılarından dolayı Whitehall Agregat Tesisi çalışanlarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Bengtsson, M., Evertsson, C., 2006. Measuring Characteristics of Aggregate Material from Vertical Shaft Impact Crushers. Minerals Engineering, 19, 1479–1486.

Bengtsson, M., Evertsson, C., 2008. Modelling of Output and Power Consumption in Vertical Shaft Impact Crushers. International Journal of Mineral Processing, 88, 18–23.

BHS Sonthofen RSMX, VSI Rotor Centrifugal Crusher Brochure, http://www.bhs-sonthofen.de/no_cache/en/products/crushing-technology/rotor-centrifugal-crusher.html?tx_z7variantsdownloads%5Bdownload%5D=13.

Lindqvist, M., 2008, Energy Considerations in Compressive and Impact Crushing of Rock. Minerals Engineering, 21, 631–641.

Metso Barmac B1100 Series VSI Crusher Operation & Maintenance Manual.

Nikolov, S., 2004, Modelling and Simulation

of Particle Breakage in Impact Crushers. International Journal of Mineral Processing, 74, 219–225.

Rodriguez D.E., 1990, The Tidco Barmac Autogenous Crushing Mill – A Circuit Design Primer. Minerals Engineering, Vol. 3, No. 1/2, pp. 53-65, 1990.



Derleme / Review

ÖN DESİLİKASYON AMAÇLI BOKSİT ZENGİNLEŞTİRME İŞLEMLERİ ÜZERİNE GÜNCEL BİR DEĞERLENDİRME

A CURRENT REVIEW ON BENEFICIATION PROCESS OF BAUXITE ORES FOR PRE-DESILICATION

Mustafa Birinci^{a,*}, Ramazan Gök^{a,**}

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

Geliş Tarihi / Received : 26 Ocak / January 2018

Kabul Tarihi / Accepted : 5 Mart / March 2018

Anahtar Sözcükler:

Bayer prosesi,
Boksit cevheri,
Reaktif silis,
Silis uzaklaştırma,
Flotasyon.

Keywords:

Bayer process,
Bauxite ore,
Reactive silica,
Silica removal,
Flotation.

ÖZ

Günümüzde ticari alümina üretiminin neredeyse tamamı hammadde kaynağı olarak boksit cevherlerinin kullanıldığı Bayer prosesiyle karşılanmaya devam etmektedir. Bayer prosesine doğrudan beslenebilir metalurjik kalitedeki boksitler için en önemli kriterlerden birisi cevherin toplam silis miktarının bilinmesidir. Çünkü, boksit liçi sırasında çözünme eğilimi gösteren reaktif silis aşırı miktarda kostik soda tüketimine yol açmakta ve ciddi oranda alumina kayıplarına neden olmaktadır. Bundan dolayı boksitin reaktif silis içeriği, Bayer prosesinin etkin ve ekonomik uygulanabilirliği üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Silis türlerinin boksitten uzaklaştırılması işlemi (ön desilikasyon) birçok alümina üretim tesisinin üzerinde çalıştığı ana konulardan birisidir. Son yıllarda köpük flotasyonu gibi bazı zenginleştirme yöntemlerinin ön desilikasyon amacıyla denendiği bilinmektedir. Bu çalışmada, boksit cevherindeki reaktif silisin sebep olduğu başlıca sorunlar ve ön desilikasyon amacıyla uygulanan birtakım zenginleştirme yöntemleri güncel kaynaklardan derlenerek özetlenmiştir. Bu yöntemler arasında gerek silis uzaklaştırma verimi gerekse tesis ölçeğinde uygulanabilme bakımından özellikle flotasyonun daha fazla önem kazandığı belirlenmiş ve bu konuda geniş kapsamda bir değerlendirme yapılmıştır.

ABSTRACT

Today, nearly all commercial production of alumina is obtained from standard Bayer process using bauxite ores as a raw material. One of the most important criteria for metallurgical-grade bauxites that can be directly fed to the Bayer process is the total silica content of bauxite. Because, reactive silica which tends to dissolve during bauxite leaching causes excessive caustic soda consumption and alumina losses in the Bayer process. For this reason, the reactive silica content in bauxite plays a critical role in the viability and economics of the Bayer process. Removing reactive silica from bauxite prior to leaching (also known as pre-desilication) is a major focus of effort for most alumina production plants. In recent years, it has been known that beneficiation methods such as froth flotation have been tried to pre-desilication. In this study, the major problems caused by reactive silica in bauxite ore and several beneficiation methods used for pre-desilication have been reviewed from the current literature. Among these methods, it has been determined that froth flotation is more important in terms of silica removal performance and industrial practice, and so investigations on bauxite flotation have been discussed extensively.

* Sorumlu yazar: mustafa.birinci@inonu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-1954-7837>

** ramazangok3434@gmail.com • <https://orcid.org/0000-0001-5654-104X>

GİRİŞ

Günümüzde bazı üstünlüklerinden dolayı en çok ihtiyaç duyulan malzemelerden birisi alüminyum (Al) metali, diğeri ise alümina (Al_2O_3) bileşimidir. Alüminyumun kullanım alanlarıyla ilgili olarak; 2011 yılında üretilen alüminyumun %25'i taşıma, %25'i yapı, %17'si paketleme, %12'si elektrik, %10'u makine ve imalat, %6'sı dayanıklı eşya üretim sektöründe kullanıldığı bilgisi bulunmaktadır (Anon (a), 2014). Üstün teknolojik özelliklerinden dolayı en az alüminyum kadar değerli olan alümina ise; başlıca Al metali üretimi üzere; aşındırıcılar, biyo-medikal malzemeler, boya, dolgu maddesi, katalizör, refrakter malzeme, saflaştırma sistemi, yalıtım malzemesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Cote vd., 2012; Donaldson ve Raahauge, 2013).

Günümüzde ticari alüminanın neredeyse tamamı tüm dünyada halen boksit cevherlerinin Bayer prosesinde işlenmesiyle üretilmektedir (Gontijo vd., 2009; Smith, 2017; Anon (b), 2017). Boksit, genel formülü $Al_2O_3 \cdot nH_2O$ olan sulu alüminyum oksit minerallerinin karışımından oluşan bir mineral grubu olarak tanımlanmaktadır. Boksitler mineralojik bileşimine ve içerdikleri Al_2O_3 'ün kaynağına göre gibsitik/hidrarjilit ($Al(OH)_3$), böhmitik ($AlO(OH)$) ve diasporitik ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) olarak üç gruba ayrılmaktadır. Ancak boksit homojen bir kimyasal bileşime ve kristal yapıya sahip bir mineral olmayıp, çeşitli minerallerin heterojen bir karışımı şeklinde doğada bulunmaktadır. Ayrıca boksit yataklarında sıklıkla karşılaşılan ve boksit mineralleriyle birlikte bulunan birtakım önemli em-püriteleri de (silis, titan gibi) içermektedir (Lozej vd., 1993; Hill ve Sehnke, 2006). Dünya genelindeki boksitlerin ortalama mineral bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Boksit cevherlerinin ortalama mineral bileşimi (Hill ve Sehnke, 2006; Smith, 2009)

Bileşik	Miktar	Yaygın Mineral Kaynakları
Al_2O_3	%35-65	Gibsit, Böhmite, Diaspor
SiO_2	%1-15	Kuars, Tridimit, Kaolinit, İllit, Halloysit, Pirofillit
Fe_2O_3	%2-30	Götite, Hematit, Pirit, Siderit
CaO	%0-55	Kalsit, Dolomit, Manyezit
TiO_2	%0.5-8	Rutil, Anataz

Boksitlerin metalurji, refrakter, aşındırıcı, çimento ve kimya endüstrisi olmak üzere beş önemli kullanım alanı bulunmaktadır (Çizelge 2). Boksit cevheri birçok alanda kullanılıyor olmasına rağmen boksitlerin birincil tüketim alanı metalurji sanayi olup, günümüzde üretilen boksitlerin büyük bir bölümü metalurjik alümina ve alüminyum metali eldesinde kullanılmaktadır.

Çizelge 2. Kullanım alanlarına göre boksit spesifikasyonları (Anon (c), 2001; Anon (d), 2017; Hill ve Sehnke, 2006'dan özetlenerek)

Kullanım Alanı	% İçerik			
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2
	50-55	0-15	5-30	0-6
Metalurji Refrakter*	>85	ma. 7.5	ma. 2.5	ma. 4
Aşındırıcı*	80-88	4-8	2-5	2-5
Çimento Kimyasal	45-55	ma. 6	20-30	ma. 3
	mi. 55	5-18	ma. 2	0-6

* Kalsine edilmiş cevher için ma: Maksimum, mi: Minimum

Alüminyum üretimi amacıyla Bayer prosesinde kullanılan cevherlere "metalurjik kalite boksit" adı verilmektedir. Boksit kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden birisi cevherdeki kazanılabilir alümina (Al_2O_3) miktarı ile reaktif silis (SiO_2) içeriği arasındaki kütleli orandır. Literatürde ve alümina endüstrisinde "silis modülü" veya yalnızca "modül" olarak isimlendirilen bu oran (Eşitlik 1), metalurjik kalite boksit cevherleri için kritik öneme sahiptir.

$$Modül = \frac{\% Al_2O_3}{\% SiO_2} \quad (1)$$

Bayer prosesinin ekonomik olarak işleyebilmesi için prosese giren cevherin silis modülünün optimum bir değerde tutulması gerekmektedir. Optimum modülün boksit tipine ve teknik-ekonomik koşullara bağlı olarak ülkeden ülkeye, tesisten tesise değişiklik göstermesine rağmen alt sınır ortalamasının 7-8 civarında olduğu kabul edilmektedir. İyi kalite boksitlerin modül değeri 10'un üzerindedir (Jiang vd., 2011; Ahmad vd.,

2014; Gibson vd., 2017) Ancak bu koşulu sağlayabilecek yüksek tenörlü/iyi kalite boksit yatakları sınırlı sayıda ve rezervleri giderek azalmaktadır. Bunun yanında düşük modüllü boksit cevherleri daha geniş yayılım göstermekte ve daha büyük rezervler oluşturmaktadır. Bu tür cevherlerin yüksek silis içeriğinden dolayı Bayer prosesinde doğrudan kullanımları mümkün olamamaktadır. Bununla birlikte bu tip cevherlerdeki silis miktarının azaltılması durumunda kostik tüketiminde önemli oranda azalmalar, alümina üretim maliyetlerinde ciddi iyileşmeler sağlanabilmektedir. Boksitlerin yüksek silis içeriğinden kaynaklı sorunların çözümüne yönelik bazı araştırmacılar tarafından birtakım yöntem ve teknikler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemlerin uygulamadaki bazı teknolojik ve ekonomik zorluklarından dolayı silis sorunu tam olarak çözülmüş değildir ve bu konudaki çalışmalar artarak devam etmektedir.

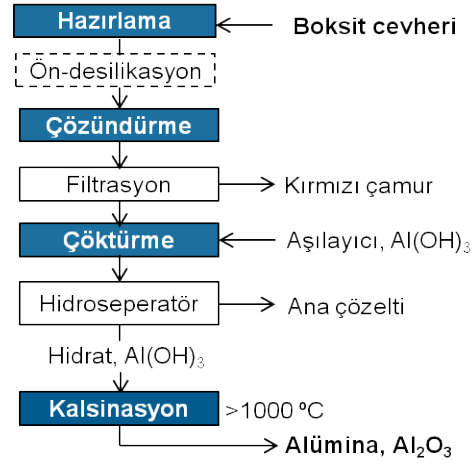
Bu çalışmada, boksit cevherlerindeki reaktif silis türlerinin Bayer sürecine olan olumsuz etkilerine değinilmiş ve boksitlerdeki reaktif silisin kaynağı olan silikat minerallerini uzaklaştırmak amacıyla uygulanan bazı zenginleştirme yöntemleri çeşitli yönleriyle ele alınıp irdelenmeye çalışılmıştır. Bu yöntemlerin her biri genel prensipleri bakımından tanıtılmış, uygulama zorluğu-kolaylığı gibi konular üzerinde durulmuştur. Daha fazla ön plana çıktığı görülen flotasyon çalışmaları üzerine geniş kapsamda bir değerlendirmede bulunulmuştur. Ayrıca tesis bazında mevcut uygulamalardan da örnekler verilerek konuya ilgi gösteren araştırmacılara yardımcı olması ve literatüre katkı sağlaması amaçlanmıştır.

1. BAYER PROSESİYLE ALÜMİNA ÜRETİMİ VE SİLİSTEN (SiO₂) KAYNAKLI SORUNLAR

1.1. Bayer Prosesi

Bayer prosesi, boksit cevheri içinde bulunan alüminyum oksidin kostik soda (NaOH) çözeltisi ile liç edilmesi ve liç çözeltisinden birtakım işlem kademelerinden sonra alümina (Al₂O₃) kazanımı temeline dayanmaktadır (Habashi, 1999; Mucsi vd., 2011). Klasik Bayer süreci; boksit cevheri hazırlama, çözündürme, çöktürme ve kalsinasyon olmak

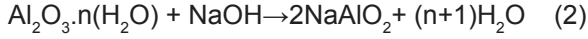
üzere standartlaşmış dört ana işlem kademesini içermektedir (Şekil 1).



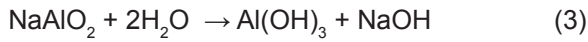
Şekil 1. Bayer prosesi genel akım şeması

(1) *Ham boksit cevherinin hazırlanması:* Boksit cevherinin hazırlanmasında amaç, çözündürme işlemi öncesi boksitin proseste işlenebilir duruma getirilmesini sağlamaktır. Yaygın olarak uygulanan başlıca hazırlama işlemleri kırma, öğütme, harmanlama, stoklama, eleme, yıkama gibi klasik işlemlerdir. Ancak bazı tesislerde, ön-desilikasyon amaçlı işlemler de (zenginleştirme, kalsinasyon gibi) uygulanmaktadır.

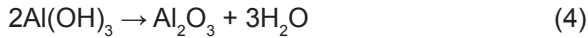
(2) *Alüminyum Çözündürme (Ekstraksiyon):* Bayer sürecinin en önemli evresi boksit cevherinin çözündürme (liç) ve kırmızı çamurun ayrılması aşamasıdır. Bu aşamada, boksit cevheri belirli bir sıcaklık ve basınç altında kostik çözeltisiyle otoklavlarda liç edilmektedir. Boksitler için genel çözünme reaksiyonunun verildiği Eşitlik 2'de görüldüğü üzere liç işlemiyle boksit cevherindeki alümina, sodyum alüminat (NaAlO₂) olarak sıvı faza geçerken, çözeltinin belli bir sıcaklıkta tutulması ile desilikasyon sağlanmakta ve çözeltideki silika içeriği çözünmeyen sodyum-alüminyum-silikat formunda çöktürülmektedir. Literatürde "desilikasyon ürünleri" olarak da tanımlanan bu bileşiklerle birlikte çözünmeyen diğer safsızlıklar (özellikle demir ve titan oksitler) katı atık (kırmızı çamur) olarak ayrılırlar (Smith, 2009). Elde edilen alüminat çözeltisi filtre edilip berraklaştırıldıktan sonra hidrat çöktürme tanklarına gönderilir.



(3) *Hidrat Çöktürmesi (Dekompozisyon)*: Çöktürme basamağında ise berrak sodyum alüminat çözeltisinden alüminyum hidrat ($\text{Al}(\text{OH})_3$) çöktürmesi gerçekleştirilir. Çöktürme işlemini hızlandırmak için liç çözeltisine aşılama hidrati ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ilave edilmekte, hidroliz reaksiyonları sonucu alüminat bileşiklerinin parçalanmasıyla alüminyum hidroksit kristalleri elde edilmektedir (Eşitlik 3). Daha sonra hidrat kristalleri zayıf çözeltiden ayrılır ve kalsinasyon fırınlarına verilmek üzere sınıflandırılır.



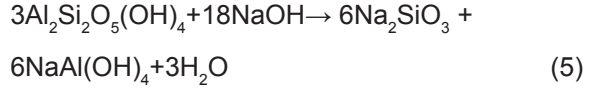
(4) *Kalsinasyon*: Bayer prosesinin ve alümina üretiminin son aşaması alüminyum hidrat kalsinasyonudur. Akışkan yatak veya döner fırınlarda yaklaşık 1100 °C'de gerçekleştirilen kalsinasyon işlemiyle alüminyum hidroksitin ($\text{Al}(\text{OH})_3$), alüminaya (Al_2O_3) dönüşümü gerçekleşmektedir (Eşitlik 4).



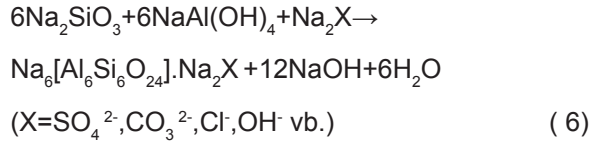
1.2. Silis Çözünmesi ve Silis Kaynaklı Sorunlar

Yukarıda özetlenmiş olan boksit çözündürme işlemi sırasında yalnızca alümina türleri çözünmemekte başlıca silis olmak üzere fosfor, klor, kükürt, flor türlerinde de çözünme meydana gelmektedir. Bunlar arasında en dikkat çekici ve alümina üretim süreçlerine daha fazla olumsuz etkileri olanı özellikle silisli safsızlıklardır. Alkali ortamda çözünme eğiliminde olan silis türüne "reaktif silis", çözünmeye karşı daha pasif davranış gösteren silis türlerine ise "reaktif olmayan silis" denilmektedir (Smith, 2009). Dünya genelinde boksitlerdeki en yaygın reaktif silis kaynağı kaolinit ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), reaktif olmayanı ise kuvars (SiO_2) mineralidir. Alümina türleri gibi reaktif silis türleri de liç işlemi sırasında NaOH çözeltisi ile reaksiyona girer ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) oluşumu meydana getirir (Eşitlik 5). Silis çözünürlüğüne etki eden faktörlerin incelendiği çalışmalarda (Jamialahmadi ve Müller-Steinhagen, 1998; Tizon vd., 2004; Zheng vd., 1997) silis çözünürlüğünün temelde kostik soda (NaOH) derişimi, alü-

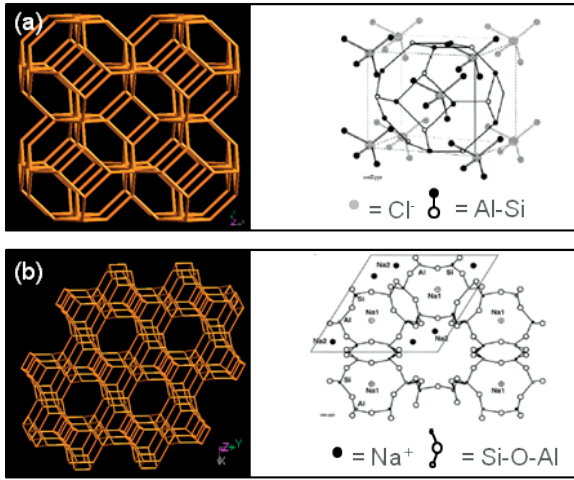
mina içeriği, sıcaklık gibi etkenlere bağlı olduğu belirtilmektedir.



Oluşan sodyum silikatlar çözeltide çözünmüş halde bulunan sodyum alüminatlar ile reaksiyona girerek az çözünen bir alüminosilikat türü oluşturur. Bu türün kritik bir konsantrasyon değerinden sonra, desilikasyon ürünleri olarak isimlendirilen sodyum alüminyum silikat kompleks bileşiği ($\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\cdot\text{Na}_2\text{X}$) kendiliğinden oluşmakta (Eşitlik 6) ve alüminat çözeltisi içerisinde çökeltmektedir.



Desilikasyon ürünleri terimi genelleşmiş bir kavram olup, kısaltılmış gösterimi DSP (De-Silication Products) literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. DSP'nin birkaç türü vardır, ancak en bilinen türleri Bayer sodalit ve kankrinit bileşiğidir. Her iki türün genel formülü (NaAlSiO_4)₆·mNa₂X·nH₂O şeklinde ifade edilmektedir (Barnes vd., 1999; Indrajith de Silva, 2013; Smith, 2009). Esasen DSP ile kastedilen, nispeten daha düşük sıcaklıklardaki çözeltiden (~120-150 °C) silis çökelten birkaç mineral fazından birisi ve en yaygını olan hidroksisodalit ($\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2$) bileşiğidir. Şekli 2(a)'da görüldüğü gibi Bayer sodalit şematik kübik yapı gösterir. Kübik kafes örgüsünde tam doluluk, Na⁺, Cl⁻ gibi tek değerlikli veya SO₄²⁻ gibi iki değerli bir iyon ile sağlanmaktadır. DSP'nin diğer türleri, boksit cevherinin kendi yapısında bulunan (veya sonradan eklenen kireç ilavesiyle) Ca bileşiklerinin çözünmesinin sonucu oluşan hidro-garnet serisi bileşikler (trikalsiyum alüminatlar) ve kankrinittir. Sodalitten farklı olarak kankrinit daha yüksek çözünme sıcaklıklarında (~220-255 °C) oluşur ve hekzagonal kafes yapısına sahiptir (Şekil 2(b) (Gerson ve Zheng, 1997).



Şekil 2. (a) Bayer sodalit kübik kafes örgüsü ve (b) kankrinitin hegzagonal yapısı (Smith, 2009; Indrajith de Silva, 2013'dan uyarlanarak)

DSP türlerinin neden olduğu başlıca sorunlar ile bunların proses üzerine olan etkileri aşağıda özetlenmiştir.

1.2.1. Aşırı soda tüketimi ve alümina kayıpları

Reaktif silis türlerinin çözünmesi ve DSP oluşması kostik tüketiminde aşırı artışlara (reaktif silika molü başına en az 1 mol NaOH) neden olmaktadır. Kostik kayıpları ile boksitin reaktif silika içeriği arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu nedenle boksitin reaktif silis içeriği genellikle bir alümina tesisinin işletme maliyetini etkileyen başlıca faktörlerden birisidir. Bunun yanında alümino silikat yapısına giren alüminyum (her ne kadar reaktif silikadan geçmiş olsa da) ciddi miktarda alümina kayıplarına yol açmaktadır. Bayer prosesi ile alümina üretiminde teorik çözünürleşme verimi formüle edilirken genellikle 1 g SiO_2 'nin 0,5 g Na_2O kaybına yol açtığı ve 0,85 g Al_2O_3 'ü bağladığı kabul edilmektedir.

1.2.2. Silikat çökmesi (kabuk oluşumu)

Çözünürlük problemleri nedeniyle sistemden tam olarak uzaklaştırılmayan desilikasyon bileşiklerinin, özellikle buharlaştırma üniteleri iç yüzeyinde çökelp birikmesiyle kabuk oluşumu

(scale formation) adı verilen ciddi bir sorunla karşılaşmaktadır. Oluşan silikat kabuk, buharlaştırma bataryalarında, çözelti iletim borularında, vanalarda kesit daralmasına ve zaman zaman da bu ünitelerde tıkanmalara yol açmaktadır. Ayrıca bu ünitelerin akış rejiminin değişmesi ve ısı transferinin azalması gibi durumlarla karşılaşmakta, proses işleyişinde teknik problemlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, oluşan kabukların temizlenmesinde çeşitli kimyasal maddelere (sülfirik asit gibi) ihtiyaç duyulması hem ilave bir maliyet oluşturmada hem de iş gücü ve zaman kaybına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra prosesin her aşamasında oluşan kabukların tür ve kompozisyonları farklı olabilmektedir. Bundan dolayı da oluşan kabuk türlerinin oluşum mekanizmasının belirlenmesi ve karakterize edilmesi zorunluluğu doğmaktadır. Bu çalışmaların sonucuna göre kabuk oluşumunun önlenmesi ve/veya oluşan kabukların nasıl giderilebileceği konusunda stratejiler geliştirilmesi ayrı bir çalışmayı gerektirmektedir.

1.2.3. Silisli türlerin alüminayı kirlenmesi

Desilikasyon işlemiyle sistemden tam olarak uzaklaştırılmayan silis türlerinin Bayer sürecinin son aşaması olan kalsinasyon basamağına kadar taşınması durumunda, kalsinasyon işlemi sonucu elde edilen alüminanın bileşimine silisli safsızlıkların da geçmesi söz konusu olmaktadır. Bu durumda, üretilen alüminanın kalitesi bozulmakta ve saflık derecesi de düşmektedir.

1.3. Silis Sorununa Yönelik Çözüm Yaklaşımları

Yukarıda bahsedilen silisin neden olduğu teknik ve ekonomik sorunlar nedeniyle Bayer prosesinin güncel handikaplarından birisi olan silis sorununun çözümüne yönelik olarak gerek alümina endüstrisi ve gerekse akademik çevrelerce bazı stratejiler geliştirme üzerine yoğun bir çalışma yürütülmektedir. Bugüne kadar geliştirilmiş olan ve her biri ayrı bir değerlendirme konusu olabilecek kapsamda olan bu stratejileri üç genel başlık altında özetlemek mümkündür.

1.3.1. Reaktif silis girdisini azaltma

Bu uygulama Bayer prosesi öncesinde ham boksit cevheri üzerinde uygulanan ön desilikasyon (pre-desilication) işlemlerini içerir. Reaktif silikaya yönelik bu işlemler doğrudan doğruya Bayer prosesine entegre olmayıp, genellikle uygun bir zenginleştirme yöntemiyle reaktif silikanın makul seviyeye düşürülmesi veya kostik çözeltisinde silikanın çözünme davranışına yönelik ön işlemler (kalsinasyon gibi) şeklinde uygulanmaktadır.

1.3.2. Bayer prosesi üzerinde bazı modifikasyonları denemek

Bu seçenekte iki durum gözetilerek modifikasyon yapılması önerilmektedir: (a) Kostik çözeltisinde çözünen reaktif silisi kimyasal yolla farklı yapıdaki çeşitli silikat türü bileşiklere dönüştürerek desilikasyon ürünleri olarak sistemden uzaklaştırmak ve/veya (b) Daha düşük soda içeriğine sahip alternatif desilikasyon ürünleri elde etmek.

1.3.3. DSP'den sodanın geri kazanımı

Kostik içeren atıkların ve desilikasyon ürünlerin yeniden işlenerek kostik sodanın bir miktarının kazanılması ve prosese tekrar beslenmesi işlemlerini kapsamaktadır.

Bu başlıkların her biri ayrıca tartışılacak çok geniş içeriğe sahiptir. Bu çalışmada, özellikle, Bayer prosesine beslenen boksit cevherindeki reaktif silis girdisini azaltmak amacıyla uygulanan cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemleri üzerinde durulmuştur.

2. REAKTİF SİLİS GİRDİSİNİ AZALTMAYA YÖNELİK BOKSİT ZENGİNLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Bayer prosesinin güncel handikaplarından birisi olarak görülen silis sorununun çözümüne yönelik yaklaşımlardan birisi yukarıda kısaca özetlenmiş olan "reaktif silis girdisini azaltma" önerisidir. Bu öneri esasen, boksit cevherindeki silisli mineralleri Bayer süreci öncesinde uzaklaştırmak amacıyla

uygulanan birtakım cevher hazırlama ve zenginleştirme yöntemlerini kapsamaktadır. Bu yöntemlerin önemli bir kısmı boksitlerden doğrudan silis uzaklaştırılmasına yönelik olarak düşünülen geleneksel zenginleştirme işlemlerini kapsamaktadır. Bir kısmı da de-silikasyon sürecinde boksit ve silis minerallerinin çözünme davranışını iyileştirmek, daha az soda içerikli DSP elde etmek amacıyla uygulanan bazı ön işlemleri (kalsinasyon, mekanik aktivasyon gibi) içermektedir.

2.1. Eleme-Yıkama

Yöntemin esası tane boyuna göre sınıflandırma ile zenginleştirme işlemine dayanmaktadır. Bu yöntemde cevher mineralleri arasındaki sertlik-kırılabilirlik, kırılış şekli/dilimim gibi fiziksel özellik farklılıklarından yararlanılmakta; boyut küçültme işlemleri sırasında iri veya ince tane boylarında mineraller belirli ölçüde birbirlerinden seçimli olarak ayrılabilir. Eleme ve yıkamayla silis uzaklaştırma yönteminin uygulanabilirliği büyük ölçüde boksitin türüne ve mineralojik yapısına bağlı kalmaktadır. Boksit cevherindeki silisli türlerin (kaolinit gibi kil minerallerinin) tercihen daha küçük tane boylarına geçmesi durumunda bu yöntem oldukça etkili olmaktadır. Özellikle pizolitik boksit cevherlerinde (bir tür oolitik yapı gösteren cevherler) silisi oluşturan mineral çoğunlukla kaolinitir ve boyut küçültme-eleme-yıkama işlemleriyle belirli ölçüde boksit minerallerinden ayrılabilir. Bu işlemin etkin ve verimli bir şekilde uygulamasının görüldüğü en tipik örnek Weipa ve Andoom (Queensland, Avustralya) boksit cevherleridir. Belirli tane boyundaki boksit cevheri genellikle titreşimli veya kavisli eleklerde yaşı olarak elenmekte, eleme işlemi sırasında suda kolay dağılabilen yüksek silis içerikli kil mineralleri ince fraksiyonda toplanarak (-1,7 mm ve -0,4 mm) cevherden uzaklaştırılabildiği aktarılmaktadır (Smith, 2009). Los Pijiguaos (Venezuela) boksit cevherleri üzerine Rousseaux vd., (2006) yaptıkları bir çalışmada, silis kaynağı olan kuvarsi cevherden uzaklaştırmak için tamburlu yıkayıcı-siklon kombinasyonunu denemişlerdir. Mısır boksitleri üzerine yapılan diğer bir çalışmada

ise, yalnızca pulverize öğütme ve sınıflandırma işlemleriyle cevherdeki kuvarsın yaklaşık %80'i uzaklaştırılabilmektedir (Amer ve Abdel-Aal, 1996). Başka bir çalışmada (Ahmad vd., 2014), boksitlerden killerin uzaklaştırılması amacıyla ultrasonik yıkama, tamburlu yıkama, su jeti ile yıkama yöntemleri kullanılmış, ayırmaya etki eden çalışma parametreleri incelenmiştir. Ultrasonik etkinin yıkamada fayda sağladığı görülmüştür.

2.2. Gravite Ayırması

Gravite yöntemi, taneler arasındaki yoğunluk farklılığından yararlanmak suretiyle silikat minerallerinin (kaolinit, kuvars vd.) boksit cevherinden belirli ölçüde uzaklaştırılması esasına dayanmaktadır. Ancak boksit mineralleri ile silikat mineralleri arasındaki yoğunluk farkı nispeten az olduğundan nadiren uygulama olanağı olan bir yöntemdir. Ayrıca gravite ayırma yönteminin etkinliği ve ayırma kalitesinin büyük oranda tane iriliğine bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle gravite ayırma, mineraller arasında en az $0,1 \text{ g/cm}^3$ kadar bir yoğunluk farkının olması koşuluyla, nispeten iri tane boylarında serbestleşmenin olduğu cevherler için önerilmektedir. Diğer taraftan, özellikle masif yapıdaki boksit cevherlerinde bileşimi oluşturan minerallerin çok az bir kısmı nadiren iri boyutlarda serbestleşebilmektedir. Bu tip cevherlerde alümina mineralleri ile silikat mineralleri arasında çok ince tane boylarında kısmi bir serbestleşme meydana gelmektedir. Gravite ayırmanın etkinliğinin azaldığı çok ince tane boylarında jig, ağır-ortam gibi klasik gravite ayırıcılar kullanılamamaktadır. Her ne kadar Knelson konsantratörü, Kelsey jigi, Multi-gravite ayırıcısı, Falcon konsantratörü gibi yeni nesil gelişmiş gravite ayırıcılarının kullanılmasıyla gravite ayırmada çok ince tane boylarına inilmiş olsa da bu tip ayırıcıların daha çok altın gibi ağır metal içerikli cevherlerin zenginleştirilmesinde daha verimli ve başarılı oldukları bilinmektedir. Bu tip ayırıcıların boksit cevherlerinin zenginleştirilmesi amacıyla kullanıldığına dair bilimsel bir çalışmaya da henüz rastlanılmamıştır.

Gravite zenginleştirme üzerine çok az sayıda literatür çalışmasına rastlanılmıştır ve bu çalışmalarda daha çok boksit cevherinin demir içeriğini düşürmek veya kalkerli safsızlıkları uzaklaştırmak amacıyla gravite ayırmanın uygulandığı belirlenmiştir. Gao vd., (2008) lateritik oluşum göstermeyen düşük kalite diasporitik boksit cevherlerinin hidrosiklonla zenginleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada, siklon alt ve üst akımından aldıkları ürünlerin Al ve Si tenörlerinde bir miktar farklılıkların olduğunu, alt akımdan alınan ürünün Al tenörünün daha yüksek, silis tenörünün daha düşük olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Bayer prosesi atıklarından titanyum minerallerinin kazanımına yönelik yapılan bir diğer çalışmada (Rao vd., 1996), gravite ayırıcı olarak sallantılı masa kullanılmış, yoğunluğu daha yüksek olan titan mineralleri (rutil ve ilmenit) daha düşük yoğunluklu minerallerden (kuvars, götit, sodalit) başarılı bir şekilde kazanılabilmektedir. Literatürde rastlanan birkaç çalışmaya rağmen, boksit cevherlerinden gravite yöntemleriyle özellikle silis gideriminin endüstriyel ölçekte (tesis bazında) büyük çapta uygulandığına dair birkaç güncel bilgiye rastlanılmıştır. Özellikle Brezilya boksitleri için geleneksel yöntemler olarak bilinen aşındırma yıkama, ağır ortam ayırması, spiral zenginleştirme, manyetik ayırma ve bunların kombinasyonlarının başarılı sonuçlar verdiğinden bahsedilmektedir (Massola vd., 2009). Bu yöntemlerin başarılı olmasında silisli safsızlıkların nispeten iri tane boylarında serbestleşmiş olması ihtimalinin önemli bir payı olduğu düşünülmektedir. Nitekim Brezilya'da iri boyutlarda serbestleşmenin olduğu gnays kökenli boksit cevherlerinden kuvarsın; amfibolit kökenlilerden ise demir ve titanlı safsızlıkların gravite yöntemlerle etkin bir şekilde uzaklaştırılabildiği ve tesis ölçeğinde (Companhia Brasileira de Alumínio) uygulandığı bilgisi bulunmaktadır (Chaves vd., 1999). Benzer konuda Yunanistan'da boksit madenciliği yapan bir firmasının (S&B Industrial Minerals, SA) boksit cevherlerindeki kalkerli safsızlıkları ağır ortam ayırması yöntemiyle başarılı bir şekilde uzaklaştırdığı bilinmektedir (Papoutes, 1999).

2.3. Manyetik Ayırma

Bu konu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, manyetik ayırmanın çoğunlukla demir, nadir olarak silis uzaklaştırma amacıyla uygulandığı görülmüştür. Manyetik ayırmayla demir uzaklaştırma işlemi daha çok refrakter kalitede boksit cevherleri söz konusu olduğunda uygulanmaktadır. Bilindiği gibi refrakter malzeme yapımında kullanılan boksitlerin demir içeriği oldukça önemlidir ve Fe_2O_3 oranının maksimum %2-3 olması koşulu vardır. Metalurjik boksit cevherleri söz konusu olduğunda ise manyetik ayırma silis uzaklaştırma amacıyla uygulanmaktadır. Bu durumda kuvars, kaolinit gibi silisli mineraller manyetik ayırmayla boksit minerallerinden ayrılmaktadır. Ancak bu ayırma işleminde boksit cevherinin mineralojik yapısı, silis minerallerinin diğer mineral(ler)le olan ilişkisi (özellikle demir-silis, demir-alümina, alümina-silis mineralleri arasındaki bağlanma durumu), serbestleşme durumu, serbest ve bağlı tane kompozisyonu, bağlı tane yoğunluğu gibi cevher yapısına bağlı özellikler son derece önemli olmaktadır. Örneğin, bazı boksit türlerinde silisli mineraller, hematit gibi manyetik özelliği olan demirli minerallere daha fazla bağlanabilmekte ve manyetik ayırmayla belirli ölçüde boksitten uzaklaştırılabilmektedir.

Bu konularda yapılan birkaç seçilmiş bilimsel çalışma (Sadler ve Venkataraman, 1991; Yılmaz, vd., 2015) incelendiğinde, manyetik ayırmanın daha çok refrakter malzeme endüstrisinin istediği spesifikasyonuna uygun özellikte düşük demir içerikli boksit üretimi amacıyla uygulandığı görülmektedir. Stamboliadis ve Kailis (2004) yaptıkları bir çalışmada, yüksek CaO içerikli boksit cevherinden kalsitin uzaklaştırılmasında yüksek alan şiddetli manyetik ayırıcı kullanmışlar ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Ancak bu çalışmaların hiç birisi henüz endüstriyel olarak uygulanamamaktadır.

2.4. Biyoliç

Son yıllarda biyoteknolojik gelişmelere bağlı olarak büyük gelişme gösteren biyolojik kazanım teknikleri

büyük oranda önem kazanmış ve madencilik endüstrisinde giderek artan bir uygulama alanı bulmuştur. Biyoliç; özetle, geleneksel liç yöntemleri ile çözünmeyen bileşiklerin, bazı bakteriler yardımıyla çözüme alınma işlemidir. Biyoliç düşük maliyetli, düşük enerji gideri, basit operasyon şartları, düşük iş gücü ve en önemlisi çevre dostu bir yöntem olmasından dolayı önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak liç etkisi büyük oranda bakterilerin verimli çalışmasına bağlı olup, metallerin en yüksek oranda ekstrakte edilmesi bakterilerin optimum büyümesi sonucunda gerçekleşmektedir.

Anand vd. (1996), boksitlerden demir ve kalsiyum türlerinin liç yöntemiyle uzaklaştırılmasına yönelik yaptıkları bir çalışmada, çeşitli bakteri türü ortamında organik asitlerin çözümdürme etkinliğini incelemişlerdir. Boksit cevherindeki kalsiyum ve demir türlerinin çözüme alınmasında organik asitlerin olumlu etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Boksitten silikatların uzaklaştırılmasına yönelik yapılan diğer bir çalışmada (Groudeva ve Groudev, 1983), silikatları uzaklaştırmak için spesifik "silikat bakteriler" kullanılmıştır. Doğada çok yaygın olarak bulunan "Bacillus subtilis" türü bakterinin silikat uzaklaştırmada oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ancak silikat türlerinin çözünmesi sırasında karşılaşılan önemli sorunlardan birisi alümina türlerinin de çözünmesi olmuştur. Bununla birlikte 5 günlük kesiksiz biyoliç süresi sonunda silikanın %55'i uzaklaştırılabilmektedir. Biyoliç yönteminin en önemli zorluğu ön işleme gerek duyulması ve bu işlemin uzun zaman almasıdır. Bir diğer husus ise bakteri liçi sırasında hem silikat hem de alumina türlerinin beraber çözünmesinden ileri gelen seçiciliğin zayıf olması sorunudur.

2.5. Seçimli Flokülasyon

Seçimli flokülasyonda amaç, istenen bir mineralin seçimli olarak flokülasyonunu (topaklanmasını) sağlamaktır. Flokülasyon işleminde yüksek molekül ağırlıklı organik polimerlerin pülp ortamına ilavesiyle taneler arasında fiziksel bir köprü mey-

dana getirilerek tanelerin birbirine bağlanması yani flok oluşumu sağlanmaktadır. Elde edildikleri kaynağa göre flokülantlar doğal (nişasta gibi) ve sentetik (poliakrilamid gibi) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Selektif flokülasyon temelde üç aşamalı bir işlem olup; (i) ince cevher karışımı disperse edilerek (dağıtılarak) mineral taneciklerinin daha dengeli duruma getirilmesi, (ii) denge durumundaki sisteme flokülant eklenerek ayrılması istenen mineralin flokülasyonu (topaklanması) sağlanması, (iii) floküle olmuş minerallerin diğer minerallerden çeşitli tekniklerle ayrılması işlemlerini kapsamaktadır.

Cevherlerin zenginleştirilmesine yönelik olarak uygulanan flokülasyon çalışmalarının özellikle ince öğütülmüş kömürler, sülfürlü cevherler (pirit, kalkopirit gibi), oksitli cevherler (hematit, volframit gibi), kil mineralleri (kaolinit, montmorillonit gibi) üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Boksit cevherlerinin flokülasyonu üzerine yapılan önceki çalışmaların bilhassa kırmızı çamurdaki götit, hematit gibi demir minerallerinin çöktürülmesine yönelik olduğu görülmektedir (Kirwan, 2009; Ballentine vd., 2011). Silis türlerinin uzaklaştırılmasına dönük flokülasyon çalışmalarına ise son birkaç yıldır başlanmış durumdadır ve bu konu güncel araştırmalar arasında yer almaktadır. Bu konuda yapılan çok az sayıdaki çalışmadan elde edilen bulgular, silis giderimine yönelik olarak uygulanan flokülasyon işleminin değerlendirilmesi gereken potansiyel bir yöntem olabileceğine işaret etmektedir. Wang vd., (2008) diasporik boksit cevherinin flokülasyonla zenginleştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada flokülant olarak sodyum poliakrilat, $(C_3H_3NaO_2)_n$ kullanılmışlar ve diaspor, kaolinit, illit ve profillit minerallerinin flokülasyon davranışını sedimentasyon testleriyle araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, sodyum poliakrilatın diaspor üzerine daha fazla adsorbe olduğu ve diasporun silikat minerallerinden ayrılmasında iyi bir seçicilik gösterdiğini göstermiştir. Liu vd., (2012) sudaki Ca^{+2} ve Mg^{+2} iyonlarının kaolinitin flokülasyon davranışına olan etkisini inceledikleri bir çalışmada, elektrolit iyonların konsantrasyonunun yanı sıra iyonik değerliliklerinin de kaolinitin çökme davranışını etkilediği sonucuna varmışlardır.

2.6. Boksitin Mekanik Aktivasyonu

Mekanik aktivasyon mekano-kimyasal bir işlem olup, katı yapısında stabil değişimler nedeniyle reaksiyon kabiliyetinde bir artış olarak tarif edilmektedir (Balaz, 2003). Mekanik aktivasyonla katı yapısında gözlenen başlıca değişimlerle ilgili olarak Tromans ve Meech (2001) bu değişimlerin yapısal düzensizlik, amorflaşma, seçimli çözünmeye uygun yeni kristal yüzeylerin ortaya çıkması, aşırı öğütme sırasında minerallerin yüzey oksidasyonu olduğunu ileri sürmüşlerdir. Mekanik aktivasyon işlemi ekstraktif metalurjide proses süreçlerini etkileyen önemli bir ön işlemdir. Spesifik yüzey alanındaki artış ve yapısal bozulmaların oluşması kimyasal reaksiyonları hızlandırmaktadır (Balaz, 2003). Düşük reaksiyon sıcaklıkları, çözünme hızındaki artışlar, suda çözünebilen bileşiklerin oluşması, daha basit ve ucuz reaktör gereksinimi ve reaksiyon sürelerinin kısalması mekanik aktivasyonun en önemli avantajlarıdır.

Mekanik aktivasyon işleminin boksit cevherlerine uygulanması ilk defa Pawlek vd., (1992) tarafından önerilmiştir. Aşırı öğütmeyle elde edilen mekanik aktivasyonun boksit cevherinin düşük liç sıcaklığında alumina kazanımına olumlu etkisinin olduğunu ve ayrıca kireç ilavesinin liç sırasında oluşan çözünmüş silika konsantrasyonunu azalttığını savunmuşlardır. Bu konu üzerine daha sonra McCormick vd., (2002) tarafından sürdürülen çalışmalarda, sisteme kireç ilave edildiğinde liç sırasında oluşabilecek fazları incelemişlerdir. Sonuç itibarıyla kireç ilavesinin, çözeltideki $Ca(OH)_2$ ile SiO_2 ve Al_2O_3 türlerinin reaksiyonu sonucunda bir tür kalsiyum-alumino-silikat-hidrat fazı olan hidrogarnet ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot (6-2m)H_2O$) oluşumuna sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, hidrogarnet oluşumunu öne çıkaran bu görüşün bazı belirsizliklerini araştırmak üzere Fortin ve Forté (2007) mekanik yolla aktive edilmiş boksit cevherinin liç davranışını tekrar test edip incelemişlerdir. Kostik kayıplarındaki azalmanın mekanik aktivasyondan mı yoksa malzemeden mi kaynaklandığı konusunda net bir sonuca varamamışlardır. Ayrıca hangi silika türlerinin ve bu türlerin ne

kadarlık miktarının (tamamının mı yoksa bir kısmının mı) hidrogarnet fazına geçtiği gibi temel konular hala tartışılmaktadır (Mehrotra vd., 2016).

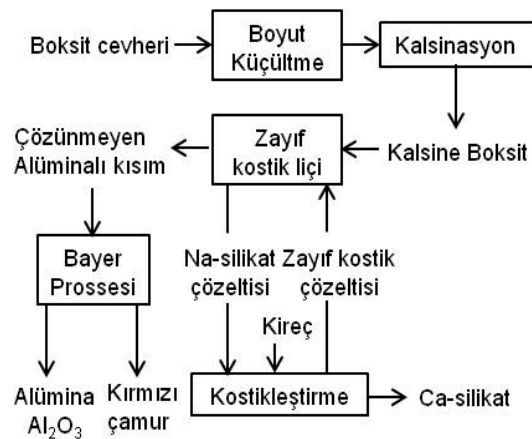
2.7. Boksitin Ön Kalsinasyonu

Kalsinasyon, liç çözeltisindeki mineral türlerinin çözünme davranışını iyileştirmek amacıyla cevherlerin belirli sıcaklıkta ısıtılması (kavurma) şeklinde özetlenebilecek bir işlemdir. Silis giderim işlemine olan olumlu katkısı ve Bayer prosesine entegre olma açısından uygulanabilirliği yüksek olan potansiyel yöntemlerden birisidir. Bayer prosesinde ön kavurma işleminden geçirilmiş boksitlerin kullanılması durumunda kostik soda tüketiminde önemli azalmaların olduğu belirtilmektedir (Smith, 2009). Bu yöntemin bilinen dezavantajı kavurma maliyetinin nispeten yüksek olmasıdır.

Boksit cevheri inert atmosfer koşullarında kavrulduğunda, ısıtma sıcaklığına bağlı olarak birtakım dehidrasyon ve dehidroksilasyon reaksiyonları oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar minerallerin kristal yapısında önemli değişimlere neden olabilmektedir. Örneğin kaolinit ısıtıldığında ilginç mikro yapısal değişimler ve karmaşık faz dönüşümleri göstermektedir. Boksit cevheri kesin bir sınır olmamakla birlikte 530-570°C sıcaklık aralığında ısıtıldığında kaolinit daha yüksek reaktivliğe sahip meta-kaolinite ($Al_2Si_2O_7$) dönüşmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda (~980°C) kristal yapı parçalanarak amorf silika ve çeşitli alümina geçiş fazlarının ($\alpha-Al_2O_3$, $\gamma-Al_2O_3$ gibi) oluştuğu bilinmektedir. Ancak bazı yazarlar (Rayzman, vd., 2003; Qiu, vd., 2004), amorf silika ile birlikte gama-alümina ($\gamma-Al_2O_3$) oluşumunu önermekle birlikte, bu evrenin oluşumu ile ilgili tartışmalar hala sürmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise yeniden kristallenme ile birlikte inert ürünler (mullit gibi) oluşmaktadır. Sonuçta boksitlerin termal aktivasyonu ile oluşan söz konusu bu yeni türlerin kostik çözeltisindeki liç davranışı olumlu sonuçlar vermektedir. Ön işlem olarak kavurma uygulanmış boksit cevheri Bayer prosesine beslendiğinde müllit gibi bazı silika türleri kostik çözeltisinde çok daha az çözüldüğünden kostik tüketimi de azalmaktadır.

Özetle, liç öncesi uygulanan kavurma işleminin ana rolü, zayıf kostik çözeltisi içinde amorf silis ve alüminyum türleri (hem kaolinden hem de gibsit ve böhmitin dehidrasyonundan gelen) arasında çözünürlük açısından belirgin bir farklılık oluşturmaktır. Silika ve alümina arasındaki çözünürlük farkını (ve böylece zayıf kostik çözeltisinin verimini) en üst düzeye çıkarmak için, yüksek kavurma sıcaklıkları (980-1100°C) önerilmektedir. Bununla birlikte kavurma sıcaklığı ne kadar yüksek olursa cevherdeki alümina o kadar çözünmez olmaktadır. Dolayısıyla kavurma sıcaklığı ile kostik liç koşulları arasında hassas bir denge oluşmaktadır ve prosesin başarısı büyük ölçüde bu dengeye bağımlı kalmaktadır. Bu dengenin kurulamaması halinde, kostik liç sırasında kavurma koşullarından kaynaklı bazı sorunlar ortaya çıkabilmektedir.

Boksit kalsinasyonu ve sonrası işlemleri içeren genel bir akım şeması Şekil 3'de verilmiştir. Silisi bağlamaya yönelik uygulanan zayıf kostik liçi sonrası çözelti ağırlıklı olarak sodyum silikat (Na_2SiO_3) içerir. Çözeltideki kararsız silis türlerini kalsiyum silikat (Ca_2SiO_4) olarak çöktürmek üzere kostik çözeltisine kireç (CaO) ilave edilir. Böylece bir yandan kalsiyum silikat çökeleği satılabilir yan ürün olarak elde edilirken, diğer taraftan zayıf kostik çözeltisi yeniden kazanılmış olmaktadır.



Şekil 3. Boksit cevherinin ön kalsinasyonu sonrası liç sürecini gösteren genelleştirilmiş akım şeması (Rayzman, 2003'den kısaltılarak)

2.8. Boksit Flotasyonu

Yüksek silis içerikli boksit cevherlerinin zenginleştirilmesine yönelik son yıllarda yapılan araştırmalar içerisinde -ki özellikle diasporitik cevherler için-köpük flotasyonunun ön plana çıktığı, bu alandaki araştırmaların her geçen gün önem kazanarak artmakta olduğu görülmektedir. Uzunca bir süre devam etmekte olan flotasyon çalışmaları neticesinde başarılı ve ümit verici laboratuvar sonuçları elde edilmiştir ve bu çalışmalar yöntemin tesis ölçeğinde ekonomik uygulanabilirliğini gündeme getirmiş durumdadır. Bundan dolayı, boksit flotasyonu konusunda yapılan çalışmaların ayrıca ele alınıp tartışılmasının gerekli olduğu düşünülerek makalenin bu bölümünde boksit flotasyonu üzerine olabildiğince ayrıntılı bir değerlendirme yapılmıştır.

Boksit flotasyonu konusundaki literatür çalışmaları incelendiğinde, hem direkt flotasyonun (direct flotation) hem de ters flotasyonun (reverse flotation) eş zamanlı ve karşılaştırmalı olarak çalışıldığı fark edilmiştir. Ayrıca her iki flotasyon denemelerinde diğer flotasyon değişkenlerine kıyasla bilhassa toplayıcı ve bastırıcı reaktiflerin etkisinin daha fazla olduğu; bu reaktif türlerinin ve kullanım miktarının flotasyonun başarısında kilit rol oynadığı ortaya konulmuştur. İster direkt isterse ters flotasyon olsun, her iki yöntem için amaç Bayer prosesine beslenebilecek kalitede düşük silis içerikli (ya da yüksek modüllü) boksit konsantresi elde etmek olmuştur. Bununla birlikte silis uzaklaştırmaya yönelik yapılmış olan flotasyon çalışmalarında çoğunlukla ters flotasyonun tercih edildiği ve ters flotasyon üzerine daha fazla sayıda çalışmanın bulunduğu belirlenmiştir.

2.8.1. Direkt (Düz) Flotasyon

Ön-desilikasyon amaçlı ilk flotasyon denemeleri Rus araştırmacılarca 1970'li yıllarda başlatıldıktan sonra (Smith, 2009), bu alandaki çalışmaların çoğunluğu Çinli araştırmacılar tarafından sistematik bir şekilde sürdürüle gelmiştir. Li ve Chen'in (1979) ilk çalışmasından sonra özellikle 2000 yılından bu yana çok önemli laboratuvar

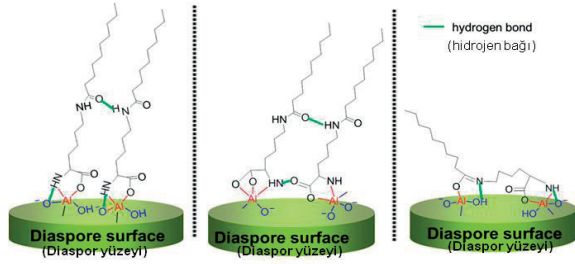
çalışmaları yapılmış ve düşük modüllü diasporitik boksit cevherlerinden silis gideriminde flotasyonun etkili bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Boksit flotasyonu üzerine son yıllarda yapılmış çalışmaların genel bir özeti Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge 3'te, toplayıcı ve düzenleyici reaktif türlerinin silis modülünde meydana getirdiği değişim önemli görüldüğünden bu bilgilere özellikle yer verilmiştir. Boksit modülünde ciddi artışların elde edildiği bu çalışmalarda bilhassa toplayıcı türü ve seçiminin önemi net bir şekilde görülmektedir.

Toplayıcılar

Diasporitik boksit cevherlerin direkt flotasyonu, genellikle diasporun pzc değerinin (~5-7,5) üstündeki pH'larda yapılmakta ve toplayıcı olarak oleat, oleik asit, tall yağı, sodyum dodesil benzen sülfonat, alifatik hidroksamik asit, aromatik hidroksamik asit vb. konvansiyonel anyonik reaktifler kullanılmaktadır. Birçok çalışmada anyonik toplayıcıların diaspor üzerine kimyasal olarak adsorbe olduğu bildirilmektedir (Jiang vd., 2011; Deng vd., 2015; Yu-ren vd., 2010; Longhua vd., 2016). Kimyasal absorpsiyonun toplayıcılar tarafından yaratılan şelat halkalarının ve bunların polar uçların mineral yüzeyinde kırılan Al-O (bazen de Al-N) bağlarına bağlanmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir (Xu vd., 2014; Jiang vd., 2011; Deng vd., 2016; Jiang vd., 2012(a)). Anyonik toplayıcıların adsorpsiyonu üzerine yapılan bir diğer çalışmada (Sanjun vd., 2013) mineral yüzeyindeki çok katmanlı adsorpsiyonun minerallerin hidrofobikliğini güçlendirdiğine dikkat çekilmektedir. Ancak bu konuyla ilgili olarak Jiang vd. (2011), karboksil ve karbamoil gibi uzun zincirli fonksiyonel gruplara sahip anyonik toplayıcıların flotasyonun seçimliliğini azaltma ihtimalinin yüksek olduğu hususuna dikkat çekmektedirler.

Oleik asit, oleat gibi yağ asitleri diasporun direkt flotasyonda kullanılan en tipik toplayıcılarıdır. Bununla birlikte yağ asitlerinin düşük çözünürlükleri, yüksek dozajlarda kullanılmaları gerekliliği, düşük seçicilikleri gibi dezavantajları bulunmaktadır. Son yıllarda hidroksamik asitler

gibi yeni tür toplayıcılar sentezlenmiş ve diasporun flotasyon verimi üzerine etkisi incelenmiştir. Her ne kadar pülp sıcaklığının, yağ asitlerinin mineral yüzeyi üzerine kimyasal adsorpsiyonunu artırdığı ve flotasyon verimini olumlu yönde etkilediği biliniyor olsa da, hidroksamin asitlerin silikat minerallerine kıyasla diaspor yüzeyine daha güçlü bir şekilde adsorbe oldukları ve yüksek flotasyon seçimliliği sağladıkları kanıtlanmıştır (Jiang vd., 2010; Jiang vd., 2012(b); Sanjun vd., 2013). Diaspor için güçlü toplayıcılık ve iyi seçicilik özelliği gösterdiği ispatlanan önemli toplayıcılardan bazıları şunlardır: Hidroksikarbamoil dodekanoik asit (HCDA), hidroksikarbamoil tetradekanoik asit (HCTA), hidroksikarbamoil heksadodekanoik asit (HCHA). Hidroksamin asitlerin yanı sıra, modifiye edilmiş karboksilat grubu bir yüzey aktif madde olan 2-amino-6-deca-namidoheksanoik asitin (AHA-10) diaspor flotasyonunda ilk defa denendiği güncel bir literatür çalışması da bulunmaktadır (Deng vd., 2016). Bu çalışmada, AHA-10'nin diaspor yüzeyine diğer anyonik toplayıcılar gibi kimyasal olarak adsorbe olduğu (Şekil 4) ve diasporun hidrofobitesini artırdığı; pH 10 civarında diaspor için yüksek seçimlilik gösterdiği sonucu çıkarılmıştır.



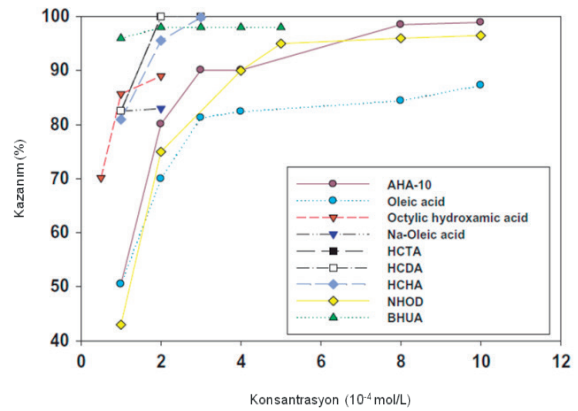
Şekil 4. AHA-10'in diaspor yüzeyine adsorpsiyon mekanizmasını açıklayan model (Deng vd., 2016)

Toplayıcı miktarındaki değişimin hem diaspor hem de alüminosilikatların yüzebilirliği üzerine çok önemli etkisi vardır. Gerek yağ asitleri gerekse hidroksamin asitler ve diğer modifiye toplayıcıların konsantrasyonundaki artışın diaspor kazanımını çok belirgin şekilde artırdığını gösteren birçok çalışma bulunmaktadır (Jiang vd., 2012(a) ve 2012(b); Deng vd., 2016). Bu durumu

özetleyen Şekil 5 incelendiğinde, toplayıcı türü ve miktarının diasporun flotasyon verimi üzerinde ne kadar etkili olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Ancak yukarıda bahsedilmiş olan ve Şekil 5'de değinilmiş olan toplayıcıların kritik bir konsantrasyon değerinden sonra alümina silikat mineralleri için de etkili olduklarına aynı araştırmacılar tarafından dikkat çekilmektedir. Bu durumda flotasyon başarısı büyük oranda toplayıcıların türüne ve flotasyonda kullanım miktarına bağlı kalmaktadır. Ancak yalnızca toplayıcı varlığında boksit mineralleriyle silikatlar arasında yeterli bir ayırımın gerçekleştirildiği flotasyon koşulunu sağlamak her zaman için mümkün olamamaktadır. Bu nedenle seçimliliği yüksek bir flotasyon için bastırıcı ve dağıtıcı reaktif kullanımı önemli olmaktadır.

Bastırıcı ve dağıtıcılar

Boksit cevherindeki silikatlar ile demirli safsızlıkları bastırmak amacıyla sodyum silikat, nişasta gibi tipik bastırıcılarla birlikte sodyum karbonat, kalgon/sodyum hegzametafosfat türü dağıtıcılar da kullanılmaktadır. Bunların diaspor flotasyonu üzerine etkileri literatürde ayrıntılı olarak çalışılmıştır (Liu vd., 2016; Xu vd., 2004; Yu-hua vd., 2008; Marino, 2012).



Şekil 5. Farklı tip anyonik toplayıcı varlığında diaspor kazanımı (Gibson vd., 2017)

Bastırıcı miktarındaki artışa bağlı olarak Al/Si modülü ile Al kazanımındaki değişimin incelendiği

Çizelge 3. Değişik tip toplayıcı ve düzenleyici reaktif varlığında boksit minerallerinin direkt flotasyonu sonucu elde edilen modül değerlerindeki değişim

Flotasyon Değişkenleri			Modül (Al_2O_3/SiO_2)		Kaynak
Toplayıcı reaktifler	Düzenleyici reaktifler	pH	Flotasyon	Flotasyon	
			Öncesi	Sonrası	
Oleik asit	SHMP, Na_2CO_3	10,5	3,39	5,33	Wang vd., 2017
Oleik asit	Na_2CO_3	10,1	5,48	11,94	Deng vd., 2016
Oleik asit	SHMP, Na_2CO_3	7	4,18	6,71	Jiang vd., 2011
AHA-10	Na_2CO_3	10,1	5,56	12,51	Deng vd., 2016
Oleat	SHMP, Na_2CO_3	7	4,19	6,71	Jiang vd., 2011
Yağ asidi	-	9-10	4,71	6,97	Gen vd., 2012
Alkil hidroksamat	Nişasta, SHMP	10,5	4,5-9,5	10,58	Marino, 2012
HCDA	SHMP, Na_2CO_3	7	4,15	8,01	Jiang vd., 2011
Sodyum oleat	Kalgon, Na_2CO_3	-	4,99	8,00	Liu vd., 2016
ZMC toplayıcı	Kalgon, Na_2CO_3	-	4,5	7,04	Liu vd., 2016

bu çalışmalarda, bastırıcı türü kısmen önemli olmakla birlikte bastırıcı miktarının çok daha etkili olduğu vurgusu yapılmıştır. Genel olarak bastırıcı/dağıtıcı konsantrasyonundaki artışın Al kazanımı üzerinde olumsuz bir etki yarattığı, bununla birlikte Al/Si oranını önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Bu sonuçlar, boksit flotasyonunda bastırıcı/dağıtıcı seçiminde dikkatli olunması ve bunların konsantrasyonlarının mutlaka optimize edilmesi gerekliliğini göstermektedir.

2.8.2. Ters flotasyon

Bir önceki bölümde diasporik cevherlerin desilikasyonunda direkt flotasyonun etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte diasporik cevherlerin ters flotasyonunun daha etkin ve ekonomik bir yöntem olabileceğini gösteren çalışmalar da bulunmaktadır (Xue-feng vd., 2008; Hu vd., 2003 ve 2012; Xia vd., 2009; Zhong vd., 2008; Xiang-qing vd., 2005). Ters flotasyon işlemi sırasında alüminosilikatların ani flotasyonu, aşırı ve kontrolsüz köpük oluşumu gibi olumsuz durumlarla karşılaşmaktadır (Yu vd., 2016). Buna rağmen, çoğunlukla katyonik toplayıcıların kullanıldığı ters flotasyonun daha düşük işletme maliyeti, daha az miktarda toplayıcı tüketimi, susuzlaştırma kolaylığı ve daha etkin

safsızlık giderimi gibi birçok avantaja sahip olduğu bildirilmektedir (Wang vd., 2004; Liu-yin vd., 2010; Sheng-gui vd., 2007; Zhang vd., 2012; Hao vd., 2011; Yue-hua vd., 2008; Xue-feng vd., 2008; Hu vd., 2003; Yu-hua vd., 2003; Xu vd., 2004; Liu vd., 2007).

Toplayıcılar

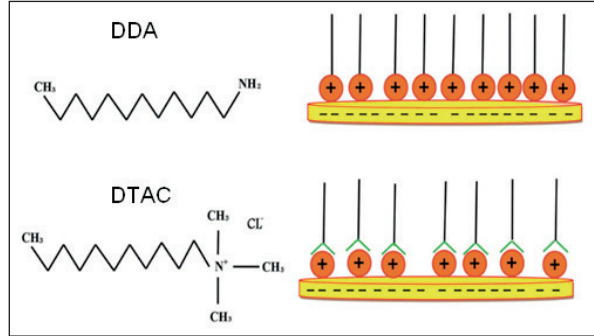
Boksit cevherlerinin ters flotasyonunda alüminosilikatlar için en güçlü ve seçiciliği yüksek toplayıcılar katyonik toplayıcılardır. Katyonik toplayıcıların aynı zamanda köpürütücü özelliği de bulunduğu ters flotasyonda çoğunlukla köpürtücüye ihtiyaç duyulmamaktadır (Xu vd., 2004 ve 2014; Hu vd., 2012; Zhong vd., 2008). Katyonik toplayıcılar her ne kadar alüminosilikat mineraller için ideal bir toplayıcı olsa da yüksek dozajlarda kullanıldıklarında boksit minerallerini de yüzdürmektedirler (Hao vd., 2011). Boksit cevherlerindeki başlıca alüminosilikat mineralleri olan kaolinit, illit, pirofillit kristallerinin katyonik toplayıcı varlığında flotasyon verimleri küçükten büyüğe doğru pirofillit > kaolinit > illit > diaspor şeklinde sıralanmaktadır (Liu vd., 2015; Yue-hua vd., 2008; Feng vd., 2009; Wang vd., 2004; Yu-hua vd., 2003).

Boksitlerin ters flotasyonunda katyonik toplayıcı olarak dodesilamin (DDA) gibi primer aminler dikkat çekmektedir. DDA'nin kullanıldığı birçok çalışma yapılmış ve diasporun alüminosilikat minerallerinden ayrılmasında başarılı olduğu görülmüştür (Çizelge 4). Son zamanlarda seçimliliği daha yüksek DDA esaslı katyonik toplayıcı sentezleme çalışmalarına yönelildiği, bunların alüminosilikat minerallerin flotasyon performansları ve seçimliliği üzerine olumlu etkiye sahip oldukları görülmüştür (Wang vd., 2004; Yue-hua vd., 2008; Xue-feng vd., 2008; Xu vd., 2014; Xia vd., 2009; Hu vd., 2012).

Sentezlenmiş katyonik toplayıcıların radikal grup sayısı, molekül şekli (halkalı molekül, zincirli molekül) ve toplam enerji seçiciliğini etkileyen önemli parametrelerdir. Başka bir ifade ile sentezlenmiş aminlerin optimal moleküler zincir uzunluğunu, uygun yapı, elektropozitiflik derecesi bu toplayıcıların seçiciliğini ve flotasyonda ayırma verimliliğini etkileyen önemli faktörlerdir. Fonksiyonel grupların zincir uzunluğunun flotasyonun seçimliliğiyle yakından ilişkili olduğu bilinen bir gerçektir. Çok uzun veya çok kısa zincirli aminler flotasyon seçiciliğini zayıflatmaktadır. Aminlerin karbon zincirinin artması kaolinitin flotasyon verimini artırdığı gibi diasporunkini de belirgin bir şekilde artırmaktadır (Feng vd., 2009; Hao vd., 2011).

Geçmişte monoamin ve primer aminler yaygın olarak incelenmiş ve ters flotasyonda kullanımları üzerine yeterli çalışma yapılmıştır. Çizelge 4'te de görüldüğü üzere kuarterner aminlerin etkisinin araştırıldığı çalışmalara daha yakın zamanda başlanmış olmasına rağmen önemli bulgulara ulaşılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular topluca değerlendirildiğinde, kuarterner amin tuzlarının seçimliklerinin daha yüksek olduğu, ancak primer aminlere göre flotasyon veriminin daha düşük olduğu sonucu çıkarılmıştır (Liu-yin vd., 2010; Thella vd., 2012; Huang vd., 2013; Liu-yin vd., 2009; Jiang vd., 2014). Kuarterner aminler pozitif yüklü bir baş grup ve hidrofobik hidrokarbon zincirlerinden oluşmaktadır (Şekil 6). Özellikle alüminosilikat mineralleri için geliştirilmiş ve bu minerallerin flotasyonunda toplayıcı olarak

denenmiş farklı zincir uzunluğuna sahip bazı kuarterner amin tuzları şunlardır: Dodesil trimetil amonyum klorür (DTAC), tetradesil trimetil amonyum klorür (TTAC), setil trimetil amonyum klorür (CTAC), setil trimetil amonyum bromür (CTAB), oktadesil dimetil benzil amonyum klorür (ODBA) vd. Farklı tipteki katyonik toplayıcı varlığında kaolinitin flotasyon verimini özetleyen bir grafik Şekil 7'de verilmiştir.

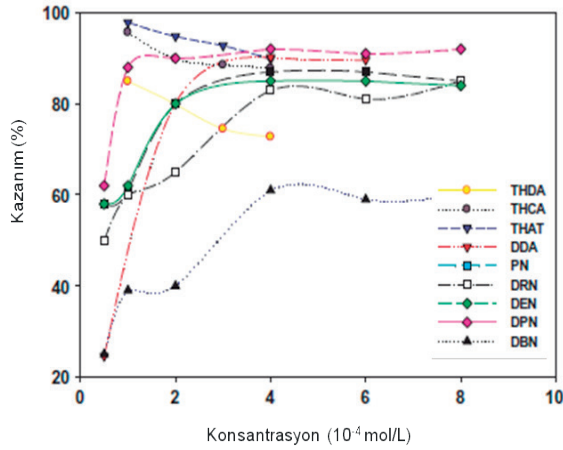


Şekil 6. Primer ve kuarterner aminlerin negatif yüklü kil yüzeyine adsorpsiyon mekanizması

Katyonik toplayıcıların gerek diaspor gerekse silikat mineralleri yüzeyine adsorpsiyonunun elektrostatik çekim kuvvetlerinden kaynaklandığı, ancak bu çekim kuvvetinin alüminosilikat mineralleri üzerinde çok daha güçlü olduğu bildirilmektedir (Hao vd., 2011; Jiang vd., 2014; Liu vd., 2011). Elektrostatik çekim kuvvetleriyle adsorpsiyon mekanizmasının oluşması, toplayıcının karbon zincirinin uzunluğunun yanında, pülpün pH derecesine bağlı kalmaktadır. Dolayısıyla diasporun katyonik flotasyonunda pülpün pH'sı kritik öneme sahip olmaktadır. Çizelge 4 incelendiğinde pülpün pH değerinin 6 ile 10 aralığında olduğu görülmektedir. Konuyla ilgili atıf yapılan diğer kaynaklarda da diasporik boksitlerin ters flotasyonunda pH'ın yaklaşık bu aralıkta seçilmesi gerektiği önerilmektedir. Ancak aynı kaynaklarda diasporun yüzey yükünün negatif olduğu pH değerlerine dikkat çekilmekte, boksit minerallerinin alüminosilikatlar ile birlikte köpükte toplanabileceği uyarısında bulunmaktadır. Bu tür olumsuz etkileri azaltmak ve daha seçimli bir flotasyon için bastırıcı reaktif kullanımının yararlı olduğu belirtilmektedir.

Çizelge 4. Değişik reaktif varlığında boksit minerallerinin ters flotasyonu elde edilen modül değerlerindeki değişim

Flotasyon Değişkenleri			Modül (Al_2O_3/SiO_2)		Kaynak
Toplayıcı reaktifler	Düzenleyici reaktifler	pH	Flotasyon Öncesi	Flotasyon Sonrası	
Dodesil amin (DDA)	$AlCl_3/Na_2SiO_3$ (3:1)	7,5	2,50	11,00	Jian, 2010
DDA	İnorganik reaktif	6-7	5,68	7,50	Yu-hua, 2003
DDA	(SFL)	7-10	5,68	10,60	Xu vd., 2004
DTAL	SHMP	6-7	5,69	10,83	Wang vd., 2004
CTAB	SFL	6	5,68	9,30	Yu-hua, 2003
CTAB	SFL	7	11,06	26,56	Rodrigues vd., 2016
AQ142	-	10	11,06	24,20	Rodrigues vd., 2016
TAS101	Nişasta	11	6,11	9,58	Yu vd., 2016
BDDA	Nişasta	9-10	6,02	9,72	Xia vd., 2009
BDDA	Nişasta	10	5,85	9,80	Liu-yin vd., 2009
CTAC	-	7	11,06	26,56	Hao vd., 2011



Şekil 7. Farklı tip katyonik toplayıcı varlığında kaolinit kazanımı (Gibson vd., 2017)

Bastırıcı ve dağıtıcılar

Boksit cevherlerin ters flotasyonunda en sık kullanılan bastırıcılardan biri sodyum heksametafosfat (SHMP) = $(NaPO_3)_6$, diğeri ise nişastadır. SHMP yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında diaspor için etkin bir bastırıcıdır. SHMP'nin diaspor yüzeyine adsorpsiyonunun kaolinit yüzeyine kıyasla oldukça yüksek olduğunu kanıtlayan çalışmalar bulunmaktadır. Ayrıca SHMP'nin adsorpsiyon yoğunluğunun pülp pH'sına bağlı olmadığı, hemen hemen tüm pH değerlerinde adsorpsiyon yeteneğinin bulunduğu bildirilmektedir (Xu vd., 2004; Marino, 2012; Xiang-qing vd., 2005). Bir organik bastırıcı olarak

nişasta, molekül ağırlıkları çok yüksek olan ve çok sayıda -OH polar grubu içeren, biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan doğal bir polisakarit türüdür. Polisakkaritlerin temel yapı birimi şeker monomerleridir. Nişasta türleri bu monomerlerin farklı şekillerde bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Diasporik boksitlerin ters flotasyonunda ve özellikle toplayıcı olarak gemini kuaterner aminler kullanıldığında diaspor üzerinde güçlü bir bastırıcı etki oluşturmaktadır. Ayrıca nişasta türlerinin diaspor üzerine adsorbe olduğu en etkin pH aralığının 9-10 olduğu bilinmektedir (Kurusu vd., 2009; Thella vd., 2012; Yu vd., 2016; Liu-yin vd., 2010). Gibsitik boksitlerin ters flotasyonu üzerine Massola vd. (2009) yaptıkları bir çalışmada, pH 10'da nişasta kullanımının gibsiti bastırmada çok etkili olduğunu, elde edilen boksit konsantrasyonunun Al/Si modülünün 11'e yaklaştığını göstermişlerdir.

Genel olarak polisakkaritlerin mineral yüzeyine adsorpsiyon mekanizması tam olarak açıklanamamış olsa da, adsorpsiyonun kimyasal yolla gerçekleştiği konusunda güncel çalışmalar bulunmaktadır. Adsorpsiyonun mineral yüzeyindeki metal katyonları (M^+) ile organik bastırıcıların polar hidroksil grupları (OH) arasındaki kimyasal bağlanma ile gerçekleştiği yorumları yapılmıştır. Polisakkaritler, yüksek bazikliğe sahip olan (sıfır yük noktası (pzc) yüksek) metal hidroksit grupları ile daha kuvvetli etkileşime girmekte ve adsorpsiyon yoğunluğu

daha yüksek olmaktadır. Boksit minerallerinin ters flotasyonunda kullanılan organik bastırıcıların adsorpsiyonu, boksit mineral yüzeyindeki mevcut Al-O bağları üzerinde gerçekleşir ve nişasta kimyasal olarak yüzeye adsorbe olmaktadır (Liu-yin vd., 2010; Li vd., 2010; Xia vd., 2009; Hai-pu vd., 2011). Kimyasal adsorpsiyonun yanında nişasta moleküllerinin boksit yüzeyine hidrojen bağlanması yoluyla da adsorbe olduğu bilinmektedir. İki polar grup arasındaki elektrostatik çekim kuvvetleri etkisiyle meydana gelen hidrojen bağlanmasında, nişastanın polar bileşiğindeki kısmi pozitif yüklü ($H^{+δ}$) atomu ile boksit mineral yüzeyindeki kısmi negatif yüklü ($O^{-δ}$) atomları arasındaki etkileşim kuvvetleri etkili olmaktadır.

Diasporik cevherlerin ters flotasyonunda etkili olabilecek başka bastırıcılar da denenmektedir. Örneğin katyonik poliakrilamidin (CPAM), pH 5,5-8,5 aralığında oldukça etkili olduğu vurgulanmaktadır (Liu vd., 2007). Birkaç istisnai çalışma haricinde, boksit minerallerinin ters flotasyonunda geleneksel bastırıcılar olarak kullanılan SHMP ve nişasta dışındaki yeni bastırıcılarla ilgili geniş çaplı çalışma henüz yapılmamıştır.

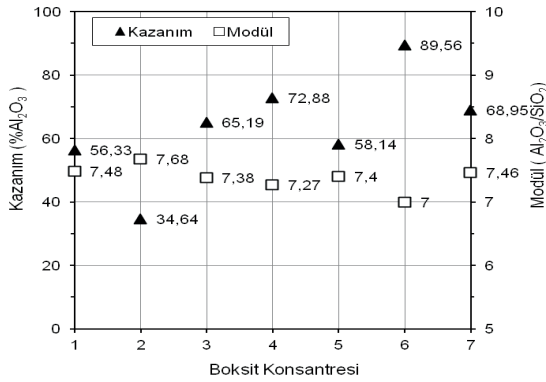
Genel olarak flotasyonda pülp içindeki çok ince tanelerin topaklanması ve iri tanelerin yüzeyini kaplamaları (şlam etkisi/slime effect) istenmeyen bir durumdur. Boksit cevherlerinin flotasyonunda da önemli olan bu duruma engel olmak ve flotasyon kimyasallarıyla (toplayıcı ve bastırıcı iyonlar) mineral taneleri arasındaki etkileşimi kolaylaştırmak amacıyla dağıtıcı özelliği olan bazı kimyasallar kullanılmaktadır. Sodyum karbonat (Na_2CO_3), boksit mineralleriyle hemen hemen her zaman birlikte bulunan kaolinitin dağıtılmasında kullanılan en yaygın dağıtıcıdır (Marino, 2012; Liu-yin vd., 2010). Ancak, Yu-hua vd. (2011) kaolinitin dağıtılmasında sodyum karbonata göre sodyum tripolifosfatın (STPP) daha iyi bir dağıtıcı olduğu yorumunda bulunmuşlardır.

Flotasyon öncesinde çok ince tanelerin uzaklaştırılması işleminin (şlam atma/de-sliming) flotasyon verimi üzerine olumlu etkisinin

olduğu yaygın olarak bilinen bir gerçektir. Bu bakımdan boksit flotasyonu öncesi şlam atmanın alternatif bir seçenek olabileceği ve bu işlemde sodyum karbonatın etkin bir dağıtıcı olarak kullanılabilmesi bazı araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Bununla birlikte şlam atma sırasında kıymetli mineral (boksit mineralleri) kayıplarının da olabileceği, bu kayıpların konsantre verimini ve Al/Si oranını düşürdüğünden de söz edilmektedir. Bu bakımdan şlam atma işleminde yukarıda bahsedilen bu durumların mutlaka göz önüne alınması gerektiği vurgulanmıştır (Wang vd., 2004; Zhang vd., 2012; Liu vd., 2015).

Türkiye’de boksit cevherlerinin zenginleştirilmesi konusundaki çalışmaların yetersiz olmasıyla birlikte, bu alanda çalışan araştırmacı sayısının da çok az olduğu sanılmaktadır. Oysa Türkiye’de birincil alüminyum üretiminin yapıldığı tek tesis olan Seydişehir (Konya) Alüminyum Fabrikası’nda zaman zaman yüksek silis içerikli düşük kalitedeki cevherlerden kaynaklı ciddi sorunların yaşandığı ve bu sorunların çözümüne yönelik arayışlar içerisine girildiği bilinmektedir (Anon (e), 2010; Anon (f) 2011). Bu konuda, ETİ Alüminyum A.Ş. bünyesinde bulunan Doğanlı-Mortaş yöresi böhmitik boksit cevherlerinden silis uzaklaştırma olanakları üzerine yürütülmekte olan güncel bir çalışma bulunmaktadır (Birinci ve Gök, 2018). Araştırma projesi kapsamındaki bu çalışmada modül değeri açısından Bayer prosesine doğrudan beslenemeyecek kalitedeki (modül ~6-6,5) cevher numunesi üzerinde bir dizi ters flotasyon denemeleri gerçekleştirilmektedir. Bu denemelerde özellikle tane boyutu, toplayıcı türü ve miktarı, pH gibi boksit flotasyonunda önemli görülen kritik değişkenlerin etkisi sistematik olarak araştırılmaktadır. Bir fikir vermesi bakımından, değişik flotasyon koşullarında elde edilmiş yedi adet boksit konsantresine ait modül ve kazanım değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Bu grup flotasyon deneylerinde toplayıcı reaktif olarak DDA birincil (primer), CTAB dördüncül (kuaterner) amin türleri kullanılmıştır. Flotasyon düzenleyicileri olarak ise nişasta ve Na_2CO_3 seçilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bütün konsantrelerde modül değeri 7’nin üzerinde olup ortalama modül 7,5

civarındadır. Diğer önemli bir bulgu ise modül değeri artarken Al_2O_3 kazanımının azalmasıdır. Genel bir fikir vermesi bakımından önemli görülen bu ara sonuçlar **ümit verici** olmakla birlikte modül değerinin daha da iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek tüm bulgu ve veriler olgunlaştırılıp değerlendirildikten sonra, sonuçların ayrı bir çalışma olarak ileriki zamanlarda yayınlanması planlanmaktadır.



Şekil 8. Seydişehir boksit cevherinin ters flotasyonu ile elde edilen konsantrelerin Al_2O_3 kazanımı ve modül değişimleri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, Bayer prosesiyle metalurjik alümina üretiminin güncel konulardan birisi olan reaktif silisten kaynaklı başlıca sorunlar özetlendikten sonra, ön-desilikasyon amaçlı boksit zenginleştirme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu konuda çok sayıda ve olabildiğince güncel olan kaynaklar incelenerek, elde edilen bilgi ve bulgular ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca Seydişehir/Konya yöresine ait yüksek silis içerikli boksit cevherlerinin zenginleştirilmesi üzerine devam etmekte olan bir çalışmadan elde edilen ara sonuçlar konuyla ilişkilendirilerek özetlenmiştir. Bu çalışmadan çıkarılabilecek belli başlı genel sonuçlar aşağıda verilen altı maddede özetlenmiştir:

1) Boksit cevherlerindeki reaktif silis, alumina üretim süreçlerinde ciddi boyutlarda teknolojik sorunlar oluşturmakta ve aşırı kostik tüketimine yol açmaktadır. Bu durum Bayer prosesine dayalı tesislerin verimli ve ekonomik çalışabilmesi üzerine

önemli etkiye sahiptir. Bayer sürecine doğrudan beslenebilir özellikteki boksitlerin alt modül değeri ülkeden ülkeye, tesisten tesise farklılık göstermesine rağmen ortalama 7-8 aralığında değişmektedir.

2) Boksit cevherindeki yüksek silisin neden olduğu sorunların çözümüne yönelik: (i) Proses öncesinde tüvenan cevherinin reaktif silis içeriğini azaltma, (ii) Daha düşük soda içerikli desilikasyon ürünleri oluşumu için Bayer prosesi üzerinde bazı modifikasyonları denemek, (iii) Desilikasyon ürünlerinden sodanın geri kazanımı olmak üzere üç farklı yaklaşım bulunmaktadır.

3) Silis sorununa yönelik çeşitli yöntem ve teknikler geliştirilmiş olmasına rağmen, bu yöntemlerin uygulamadaki bazı teknolojik ve ekonomik zorluklarından dolayı, silis sorunu tam olarak çözüme kavuşturulamamıştır ve bu konudaki çalışmalar güncelliğini koruyarak devam etmektedir.

4) Geleneksel zenginleştirme yöntemleriyle silis uzaklaştırmanın başarısı önemli ölçüde boksit türü ve kökenine bağlı kalmaktadır. Örneğin, sedimanter kökenli ve pizolitik yapı gösteren boksitlerden silis uzaklaştırmada aşındırılmalı yıkama, gravimetrik ayırma gibi yöntemler başarılı sonuçlar verebilmektedir. Oysa masif yapıdaki boksitler söz konusu olduğunda fiziksel zenginleştirme yöntemleri etkisiz kalmaktadır.

5) Son yıllarda silis uzaklaştırmaya yönelik olarak yapılan boksit zenginleştirme çalışmaları içerisinde özellikle flotasyon yönteminin daha fazla önem kazandığı, bu yöntemle daha başarılı ve ümit verici bulgulara ulaşıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda ağırlıklı olarak diasporitik boksit cevherleri üzerine yoğunlaşmıştır. Bu tip cevherlerde boksit ile silis mineralleri arasında yaklaşık 20-200 μm tane boylarında yeterli serbestleşme meydana gelmektedir ve bu boyutlarda flotasyonla zenginleştirme mümkün olabilmektedir.

Boksit cevherinden silis uzaklaştırmada flotasyon işlemi iki şekilde uygulanabilmektedir. Direkt (düz) flotasyon işleminde boksit mineralleri yüzdürülerek köpükte toplanmakta, silis mineralleri ise pülp içerisinde bırakılarak bastırılmaktadır. Bu uygulamada boksit mineralleri için genellikle an-

yonik toplayıcılar kullanılmaktadır. Ters flotasyon işleminde ise bu defa silis mineralleri yüzdürülmemekte, boksit mineralleri ise bastırılmaktadır. Silis mineralleri için tercih edilen en yaygın toplayıcılar amin türü kimyasallardır. Bu konuda yapılan flotasyon çalışmalarında çoğunlukla ters flotasyonun tercih edildiği saptanmıştır. Silis giderimine yönelik bu çalışmalarda flotasyon mekanizmasına ve ürün kalitesine etki eden çeşitli parametrelerin etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçta, boksit flotasyonu başarısında en önemli faktörün uygun reaktif seçimi olduğu anlaşılmaktadır. Seçimliliği yüksek ve nispeten daha ucuz toplayıcı reaktif geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Endüstriyel ölçekte boksit flotasyonuna ilk olarak 2002 yılında Çin'de (Chalco Bauxite Mining Company, Zhongzhou-Henan) başlanmıştır. Düşük kalite (düşük modüllü) diasporik boksitlerin kullanıldığı bu tesiste flotasyonla yüksek modüllü boksit konsantresi elde edilebilmiştir. Tesis bazında başarılı sonuçların elde edildiği flotasyon yönteminin benzer oluşum gösteren diğer boksit cevherleri için de denenerek yaygınlaşması beklenmektedir.

6) Türkiye'deki mevcut boksit cevherlerinin zenginleştirilmesi konusunda literatüre yansıyan çalışma sayısı neredeyse yok denecek kadar azdır. Diğer taraftan Bayer prosesine beslenecek uygun kalitedeki boksit rezervlerinin hızla azalması, alüminyum ve alüminaya olan talebin yıldan yıla artması, üretim maliyetlerindeki beklenmedik artışlar dikkate alındığında özellikle yüksek silis içeriğinden dolayı kullanım imkanı olmayan düşük kalitedeki boksit rezervlerinin değerlendirilme olanaklarının yakın gelecekte gündeme gelmesi kaçınılmaz görünmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nce desteklenen 2016/97 nolu projenin bir parçası olarak hazırlanmıştır. Yazarlar, özellikle, silis sorunuyla ilgili kurumsal bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan ETİ Alüminyum A.Ş. Yetkililerine, Kalite-Kontrol Çalışanlarına, Ar-Ge Müdürlüğü Personeline ayrıca teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Ahmad I., Hartge, E. U., Werther, J., Wischnews-ki, R., 2014. Bauxite Washing For the Removal of Clay. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 21 (11), 1045-1051.

Amer, A. M., Abdel-Aal, E. A., 1996. Mineralogical Studies And Hydrometallurgical Processing of Egyptian Bauxite. Transactions of the Indian Institute of Metals, 49 (1-2), 25-28.

Anand, P., Modak, J.M., Natarajan, K.A., 1996. Bio-Beneficiation of Bauxite Using Bacillus Polymyxa-Calcium and Iron Removal. Int. Journal of Mineral Processing, 48 (1-2), 51-60.

Anon (a), 2014. Aluminium, Production and Consumption. <http://www.lme.com/en-gb/metals/non-ferrous/aluminium/production-and-consumption>. Son erişim tarihi: 16 Şubat 2014.

Anon (b), 2017. Alumina Production. <http://www.world-aluminium.org/statistics/alumina-production/>, Son erişim tarihi: 25 Aralık 2017.

Anon (c), 2001. DPT, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Metal Madenler Alt Komisyonu, Boksit Çalışma Grubu, 41.

Anon (d), 2017. Specification For Bauxite For Use in the Production of Alumina: Bıs Is 5953-1985 (R2008). <http://www.worldstdindex.com/soft4/3944269.htm>, Son erişim tarihi: 25 Aralık 2017.

Anon (e), 2010. Alümina Üretim Tesisinde Meydana Gelen Kabukların Oluşum Mekanizmasını Anlamak, Buharlaştırma Bataryalarında Ve Otoklav Ön Isıtıcılarında Kabuk Oluşumunu Önlemek. 1501 TÜBİTAK TEYDEB Projesi (Proje No: 3100088), ETİ Alüminyum A.Ş., Alümina Fabrikası Müdürlüğü.

Anon (f), 2011. Boksitten Gelen Silisyumun Fiziksel ve Kimyasal Reaksiyonlarla Uzaklaştırılması ve bu Yolla Alümina Üretiminde Kullanılan Kostik Miktarının Azaltılması. 1501 TÜBİTAK TEYDEB Projesi (Proje No: 3100309), Kostik Projesi Raporu, ETİ Alüminyum A.Ş., Alümina Fabrikası Müdürlüğü.

Balaz, P., 2003. Mechanical Activation in Hydro-metallurgy. International Journal of Mineral Processing, 72, 341-354.

- Ballentine, F., Lewellyn, M. E., Moffatt, S. A., 2011. Red Mud Flocculants Used in the Bayer Process. *Light Metals 2011* (Edited by: Stephen J. Lindsay, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), pp107-112.
- Barnes, M. C., Addai-Mensah, J., Gerson, A. R., 1999. The Solubility of Sodalite and Cancrinite in Synthetic Spent Bayer Liquor. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Eng. Aspects*, 157(1-3), 101-116.
- Birinci, M., Gök, R., 2018. Düşük Modüllü Metalurjik Boksit Cevherlerinin Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması. 2016/97 Nolu Proje Sonuç Raporu (Yayınlanmamış), İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Malatya.
- Chaves, P., Bergerman, M., Abreu, C. A. V., Bigogno, N., 1999. Concentration of Bauxite Fines Via Gravity Concentration. *R. Escola de Minas*, 62 (3), 277-281.
- Cote, M., Caudron, G., Tanguay J. 2012. High Purity Alumina (HPA) Market Potential and Orbite's Competitive Advantages. *Orbite Alumina Inc. Special Report*.
- Deng, L., Wang, S., Zhong, H., Liu, G., 2015. N-(6-(Hydroxyamino)-6-Oxo-hexyl) Decanamide Collector: Flotation Performance and Adsorption Mechanism to Diaspore. *Applied Surface Science*, 347, 79-87.
- Deng, L., Wang, S., Zhong, H., Liu, G., 2016. A Novel Surfactant 2-Amino-6-Decanamido-hexanoic Acid: Flotation Performance and Adsorption Mechanism to Diaspore. *Minerals Engineering*, 93, 16-23.
- Donaldson, D., Raahauge, B., 2013. *Essential Readings in Light Metals, Volume 1, Alumina and Bauxite* (Edited by Don Donaldson and Benny E. Raahauge). John Wiley & Sons Inc. Pub., p1188.
- Feng, G., Hong, Z., Guang-yi, L., Sheng-gui, Z., Liu-yin, X., 2009. Flotation of Aluminosilicate Minerals Using Alkylguanidine Collectors. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19, 228-234.
- Fortin, S., Forté, G., 2007. Mechano-Activated Bauxite Behaviour. *Light Metals, Orlando/Florida*, pp.87-92.
- Gao, S. L., Li, X. A., Wei, D. Z., Fang, P., Jia, C. Y., Liu, W. G., Han, C., 2008. Beneficiation of Low-Grade Diasporic Bauxite With Hydrocyclone. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18 (2), 444-448.
- Gen, H., Changchun, Z., Jiongtian, L., 2012. Effects of Different Factors During the Desilication of Diaspore By Direct Flotation. *International Journal of Mining Science and Technology*, 22, 341-344.
- Gerson, A. R., Zheng, K., 1997. Bayer Process Plant Scale: Transformation of Sodalite to Cancrinite. *Journal of Crystal Growth*, 171 (1-2), 209-218.
- Gibson, B., Wonyen, D. G., Chelgani, S. C., 2017. A Review of Pretreatment of Diasporic Bauxite Ores By Flotation Separation. *Minerals Engineering*, 114, 64-73.
- Gontijo, G. S., De Araújo, A. C. B., Prasad, S., Vasconcelos, L. G. S., Alves, J. J. N., Brito, R. P., 2009. Improving the Bayer Process Productivity-An Industrial Case Study. *Minerals Engineering*, 22 (13), 1130-1136.
- Groudeva, V.I., Groudev, S.N., 1983. Bauxite Dressing by Means of *Bacillus Circulans*. *Travaux (ICSOBA)*, 13 (18), 257-263.
- Habashi, F., 1999. *A Textbook of Hydrometallurgy. Métallurgie Extractive Québec Pub., Canada*, 739.
- Hai-pu, L., Sha-sha, Z., Hao, J., Bin, L., Xing, L., 2011. Effect of Degree of Substitution of Carboxymethyl Starch on Diaspore Depression in Reverse Flotation. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 1868-1873.
- Hao, J., Long-hua, X., Yue-hua, H., Dian-zuo, W., Chang-kai, L., Wei, M., Xing-jie, W., 2011. Flotation and Adsorption of Quaternary Ammonium Cationic Collectors on Diaspore And Kaolinite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 2528-2534.
- Hill, V. G., Sehnke, E. D., 2006. *Bauxite, Industrial Minerals & Rocks: Commodities, Markets, and Uses* (Edited by Kogel, J. E.). Published by SME, Colorado, USA, pp227-261.
- Hu, Y., Liu, X., Xu, Z., 2003. Role of Crystal Structure in Flotation Separation of Diaspore From Kaolinite, Pyrophyllite and Illite. *Minerals Eng.* 16, 219-227.

- Hu, Y., Chen, P., Sun, W., 2012. Study on Quantitative Structure-Activity Relationship of Quaternary Ammonium Salt Collectors For Bauxite Reverse Flotation. *Minerals Engineering*, 26, 24-33.
- Huang, Z., Zhong, H., Wang, S., Xia, L., Liu, G., 2013. Comparative Studies on Flotation of Aluminosilicate Minerals With Gemini Cationic Surfactants BDDA and EDDA. *The Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 3055-3062.
- Indrajith de Silva, H., 2013. Recovery of Desilication Product in Alumina Industry. PhD Thesis, The University of Queensland, Australia.
- Jamialahmadi, M., Müller-Steinhagen, H., 1998. Determining Silica Solubility in Bayer Process Liquor. *The Journal of The Minerals (JOM), Metals & Materials Society (TMS)*, 50 (11), 44-49.
- Jian, G., 2010. A Novel Depressor Useful For Flotation Separation of Diaspore and Kaolinite. *Mining Science and Technology*, 20, 292-295.
- Jiang, Y., Zhao, B., Zhou, X., Zhou, L., 2010. Flotation of Diaspore and Aluminosilicate Minerals Applying Novel Carboxyl Hydroxamic Acids As Collector, *Hydrometallurgy*, 104, 112-118.
- Jiang, Y., Li, W., Feng, R., 2011. Preparation and Performance of 4-Alkyl-4,4-Bis (Hydroxycarbonyl) Carboxylic Acid For Flotation Separation of Diaspore Against Aluminosilicates. *Miner. Eng.* 24, 1571-1579.
- Jiang, Y., Pan, Y., Chen, D., Wang, F., Yan, L., Li, G., Xue, Y., 2012(a). A Theoretical Study of The Effect of Carboxyl Hydroxamic Acid on the Flotation Behavior of Diaspore and Aluminosilicate Mineral. *Clays and Clay Minerals*, 60 (1), 52-62
- Jiang, Y., Li, X., Feng, R., Chen, D., Li, J., 2012(b). Novel alkyl bis(hydroxycarbonyl) propionic acids for flotation separation of diaspore against aluminosilicate minerals. *Separation and Purif. Tech.*, 87, 135-141.
- Jiang, H., Sun, Z., Xu, L., Hu, Y., Huang, K., Zhu, S., 2014. A Comparison Study of the Flotation and Adsorption Behaviors of Diaspore and Kaolinite With Quaternary Ammonium Collectors. *Minerals Engineering*, 65, 124-129.
- Kirwan, L. J., 2009. Investigating Bauxite Residue Flocculation by Hydroxamate and Polyacrylate Flocculants Utilising the Focussed Beam Reflectance Measurement Probe. *International Journal of Mineral Processing*, 90 (1-4), 74-80.
- Kurusu, R.S., Chaves, A.P., Andrade, C.F., Abreu, C.A.V., 2009. Concentration of Bauxite Fines Via Froth Flotation. *REM: R. Esc. Minas*, 62 (3), 271-276.
- Li, Y., Chen, D., 1979. Beneficiation of Diaspore-Kaolinite Bearing Bauxite by Flotation. *Acta Metallurgica Sinica*, 15 (3), 319-322.
- Li, H., Zhang, S., Jiang, H., Hu, Y., Wang, D., 2010. Selective Depression of Diaspore With Waxy Maize Starch. *Minerals Engineering*, 23, 1192-1197.
- Liu, J., Wang, X., Lin, C., Miller, J. D., 2015. Significance of Particle Aggregation en the Reverse Flotation of Kaolinite From Bauxite Ore. *Minerals Engineering*, 78, 58-65.
- Liu, W., Sun, W., Hu, Y., 2012. Effects of Water Hardness on Selective Flocculation of Diasporic Bauxite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (9), 2248-2254.
- Liu, C., Feng, A., Guo, Z., 2016. Investigation and Optimization of Use of Anionic Collectors in Direct Flotation of Bauxite Ores. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52 (2), 932-942.
- Liu, C., Ansheng, F., Zhenxu, G., Xuefeng, C., Yuehua, H., 2011. Flotation Behavior of Four Dodecyl Tertiary Amines as Collectors of Diaspore And Kaolinite. *Min. Sci. Technol. (China)* 21, 249-253.
- Liu, G., Zhong, H., Hu, Y., Zhao, S., Xia, L., 2007. The Role of Cationic Polyacrylamide in the Reverse Flotation of Diasporic Bauxite. *Minerals Eng.*, 20, 1191-1199.
- Liu-yin, X., Hong, Z., Guang-yi, L., Shuai, W., 2009. Utilization of Soluble Starch as A Depressant For The Reverse Flotation of Diaspore From Kaolinite. *Minerals Engineering*, 22, 560-565.
- Liu-yin, X., Hong, Z., Guang-yi, L., 2010. Flotation Techniques For Separation of Diaspore From Bauxite Using Gemini Collector and Starch Depressant. *The Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20, 495-501.
- Longhua, X., Faqin, D., Houqin, W., Jing, L., Zhen, W., Jinming, W., 2016. Surface Crystal Chemistry In Selective Flotation of Diaspore From Kaolinite Using Anionic Collector. *Acta Mineral. Sin.* 36 (2), 265-270.

- Lozej, K. P., Gow, N. N., 1993. Bauxite, *Geoscience Canada*, 20 (1), 9-16.
- Marino, S.L., 2012. The Flotation of Marginal Gibbsite Bauxite Ores from Paragominas-Brazil, (Master's thesis), The University of Utah, Department of Metallurgical Engineering, 1-108.
- Massola, C.P., Chaves, A.P., Lima, J.R.B., Andrade, C.F., 2009. Separation of Silica From Bauxite Via Froth Flotation. *Minerals Engineering*, 22 (4), 315-318.
- McCormick, P.G., Picaro, T., Smith, P.A.I., 2002. Mechanochemical Treatment of High Silica Bauxite With Lime. *Minerals Engineering*, 15 (4), 211-214.
- Mehrotra, S. P., Alex, T. C., Greifzu, G., Kumar, R., 2016. Mechanical Activation of Gibbsite and Boehmite: New Findings and their Implications, *Trans. of the Indian Institute of Metals*, 69 (1), 51-59.
- Mucsi, G., Csöke, B., Solymár, K., 2011. Grindability Characteristics of Lateritic and Karst Bauxites. *Int. Journal of Mineral Processing*, 100(3-4), 96-103.
- Papoutes, A., 1999. Beneficiation Plant For the Bauxite of Silver & Baryte Ores Mining Co. S. A. , *Travaux de l'ICSIBA*, No.30, pp. 85-88.
- Pawlek, F., Kheiri, M.J., Kammel, R., 1992. The Leaching Behaviour of Bauxite During Mechano-Chemical Treatment. *Proce. of TMS Light Metals*, 91-95.
- Qiu, G., Jiang, T., Li, G., Fan, X., Huang, Z., 2004. Activation and Removal of Silicon In Kaolinite by Thermochemical Process. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 33 (2), 121-128.
- Rao, M. B. S., Das, B., Mohapatra, B. K., Paul, A. K., 1996. Beneficiation of Titanium Minerals From Sand Rejects of an Alumina Refinery Plant by Gravity Separation. *Powder Handling and Pro.*, 8 (4), 351-353.
- Rayzman, V.L., Aturin, A. V., Pevzner, I. Z., Sizyakov, V. M., Ni, L. P., Filipovich, I. K., 2003. Extracting Silica and Alumina From Low Grade Bauxite. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*, 55 (8), 47-50.
- Rodrigues, O.M.S., Peres, A.E.C., Henriques, A.B., Amorim, B.G., 2016. Kaolinite Removal From Bauxite By Flotation. *International Engineering Journal (Former Title: REM-Revista Escola de Minas)*, 69 (3), 349-353.
- Rousseaux, J. M., Verschuur, H., Flores, P., Buntensch, S., Donhauser, F., 2006. Beneficiation of High Quartz Content Bauxite From Los Pijiguaos. *Proceedings of TMS Light Metals*, pp.47-52.
- Sadler, L.Y., Venkataraman, C., 1991. A Process For Enhanced Removal of Iron From Bauxite Ores. *Int. Journal of Mineral Processing*, 31 (3-4), 233-246.
- Sanjun, L., Wenqing, Q., Tiefeng, P., Yuehua, H., 2013. Flotation Mechanism of Octylic Hydroxamic Acid on Diaspore. *Chinese J. of Geochemistry*, 32, 191-194.
- Sheng-gui, Z., Hong, Z., Guang-yi, L., 2007. Effect of Quaternary Ammonium Salts on Flotation Behavior of Aluminosilicate Minerals. *J. Central South University of Tech.*, 14 (4), 500-503.
- Smith, P., 2017. Reactions of Lime Under High Temperature Bayer Digestion Conditions. *Hydrometallurgy*, 170, 16-23.
- Smith, P., 2009. The Processing of High Silica Bauxites-Review of Existing and Potential Processes. *Hydrometallurgy*, 98, 162-176.
- Stamboliadis, E.Th., Kailis, G. 2004. Removal of Limestone From Bauxite by Magnetic Separation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 4 (2), 84-90.
- Thella, J.S., Mukherjee, A.K., Srikakulapu, N.G., 2012. Processing of High Alumina Iron Ore Slimes Using Classification And Flotation. *Powder Tec.*, 217, 418-426.
- Tizon, E.; Clerin, P.; Cristol, B. 2004. Effect of Predesilication and Digestion Conditions on The Silica Level in Bayer Liquor. *Light Metals*, 9-14.
- Tromans, D. ve Meech, J.A., 2001. Enhanced Dissolution of Minerals: Stored Energy, Amorphism and Mechanical Activation. *Minerals Engineering*, 14 (11), 1359-1377.
- Wang, Y., Hu, Y., He, P., Gu, G., 2004. Reverse Flotation For Removal of Silicates From diasporic-Bauxite. *Minerals Engineering*, 17, 63-68.
- Wang, Y., Huang, C., Hu, Y., Lan, Y., 2008. Beneficiation of Diasporic-Bauxite Ore By Selective Flocculation With A Polyacrylate Flocculant. *Minerals Engineering*, 21 (9), 664-672.

- Wang, Y., Feng, Y., Zhang, Q., Lu, D., Hu., Y., 2017. Flotation Separation of Diaspore From Aluminosilicates Using Commercial Oleic Acids of Different Iodine Values. *Int. Journal of Mineral Processing*, 168, 95-101.
- Xia, L., Zhong, H., Liu, G., Huang, Z., Chang, O., 2009. Flotation Separation of the Aluminosilicates From Diaspore By A Gemini Cationic Collector. *Int. Journal of Mineral Processing*, 92, 74-83.
- Xiang-qing, C., Yue-hua, H., Yu-hua, W., Dao-lin, X., 2005. Effects of Sodium Hexmetaphosphate on Flotation Separation of Diaspore and Kaolinite. *Journal of Central South University of Technology*, 12 (4), 420-424.
- Xu, Z., Plitt, V., Liu, Q., 2004. Recent Advances in Reverse Flotation of Diasporic Ores-A Chinese Experience. *Minerals Engineering*, 17, 1007-1015.
- Xu, L., Hu, Y., Dong, H., Gao, Z., Wu, H., Wang, Z., 2014. Anisotropic Adsorption of Oleate On Diaspore and Kaolinite Crystals: Implications For Their Flotation Separation. *Applied Surface Science*, 321, 331-338.
- Xue-feng, C., Li-min, Z., Yue-hua, H., Chang-miao, L., Kui, O., 2008. Synthesis of N, Ndiethyl Dodecyl Amine and Its Flotation Properties on Bauxite. *J. Central South University of Tech.*, 15, 188-192.
- Yilmaz, K., Birol, B., Saridede, M.N., Yiğit, E., 2015. Pre-Beneficiation of Low Grade Diasporic Bauxite Ore By Reduction Roasting. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *Int. Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 9 (9), 1075-1078.
- Yu, X., Wang, H., Wang, Q., Feng, B., Zhong, H., 2016. Flotation of Low-Grade Bauxite Using Organosilicon Cationic Collector and Starch Depressant. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 26, 1112-1117.
- Yue-hua, H., Kui, O., Xue-feng, C., Li-min, Z., 2008. Flotation of Kaolinite and Diaspore With Hexadecyl Dimethyl Benzyl Ammonium Chloride. *J. Central South University of Tech.*, 15, 378-381.
- Yu-hua, W., Yue-hua, X., Xiao-wen, L., 2003. Flotation De-Silicating From Diasporic-Bauxite With Cetyl Trimethylammonium Bromide. *J. Central South University of Tech.*, 10 (4), 324-328.
- Yu-hua, W., Chuan-bing, H., Yue-hua, H., Ye-min, H., Ye, L., 2008. Beneficiation of Diasporic-Bauxite Ore By Selective Flocculation With A Polyacrylate Flocculant. *Minerals Engineering*, 21, 664-672.
- Yu-hua, W., Daxiang, S., Liguang, W., Yulin, Z., 2011. Effects of Sodium Tripolyphosphate And Sodium Carbonate on the Selective Flocculation of Diasporic-Bauxite in the Presence of Calcium And Magnesium Ions. *Minerals Engineering*, 24, 1031-1037.
- Yu-ren, J., Zhi-gang, Y., Yun-lai, Y., Xiao-hong, Z., 2010. Synthesis and Collecting Properties of Novel Carboxyl Hydroxamic Acids For Diaspore and Aluminosilicate Minerals. *Miner. Eng.*, 23, 830-832.
- Zhang, X., Fang, J., Liu, D., 2012. Application Of Intensifying Secondary Concentration Technology en Reverse Flotation of Bauxite. *Applied Mechanics and Materials*, 161, 6-10.
- Zheng, K., Gerson, A. R., Addai-Mensah, J., Smart, R. St.C., 1997. The Influence of Sodium Carbonate on Sodium Aluminosilicate Crystallisation and Solubility in Sodium Aluminate Solutions. *Journal of Crystal Growth*, 171 (1-2), 197-208.
- Zhong, H., Liu, G., Xia, L., Lu, Y., Hu, Y., Zhao, S., Yu, X., 2008. Flotation Separation of Diaspore From Kaolinite, Pyrophyllite and Illite Using Three Cationic Collectors. *Minerals Engineering*, 21, 1055-1061.