



Orijinal Araştırma / Original Research

## MUSKOVİTİN KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENDE YAŞ ÖĞÜTÜLMESİNDE ÖĞÜTME YARDIMCILARININ ETKİSİ

### THE EFFECT OF GRINDING AIDS ON WET GRINDING OF MUSCOVITE IN A STIRRED BALL MILL

Serkan Çayırılı<sup>a,\*</sup>, Hasan Serkan Gökçen<sup>b,\*\*</sup>, Volkan Bozkurt<sup>b,\*\*\*</sup>, Yaşar Ucbas<sup>b,\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Niğde, TÜRKİYE

<sup>b</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, TÜRKİYE

**Geliş Tarihi / Received** : 05 Nisan / April 2018

**Kabul Tarihi / Accepted** : 13 Temmuz / July 2018

#### Anahtar Sözcükler:

Muskovit,  
Kariştırmalı değirmen,  
Öğütme yardımcısı,  
Kayma gerilmesi,  
Viskozite.

#### Keywords:

Muscovite,  
Stirred ball mill,  
Grinding aid,  
Shear rate,  
Viscosity.

#### ÖZ

Bu çalışmada, muskovitin kariştırmalı bilyalı değirmende mikronize boyuta ( $d_{50}$ : 15  $\mu\text{m}$ ) yaş öğütülmesinde öğütme yardımcılarının (sodyum hegzametafosfat ve poliakrilik asit sodyum tuzu) etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, özgül enerji tüketimi (kWs/t) ve ürünlerin pülp akış özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarından, 4000 g/t sodyum hegzametafosfat kullanımı ile özgül enerji tüketiminden %10,4 ve 1000 g/t poliakrilik asit sodyum tuzu kullanımı ile enerji tüketiminden %9,9 enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür. Ayrıca, öğütme yardımcılarının pülpün kayma gerilmesi ve viskozite değerlerini azalttığı ancak akış tipini (dilatant) değiştirmedeği tespit edilmiştir. Pülp akış parametrelerindeki bu azalışın enerji tasarrufunun nedeni olduğu sonucuna varılmıştır.

#### ABSTRACT

In this study, the effects of grinding aids (sodium hexametaphosphate and polyacrylic acid sodium salt) on the wet grinding of muscovite to micronized size ( $d_{50}$ : 15  $\mu\text{m}$ ) in stirred ball mill were investigated. The results were evaluated based upon the specific energy consumption (kWh/t) and flow characteristics of the products. Experimental results showed that 10.4% of energy savings can be obtained by using of 4000 g/t sodium hexametaphosphate and 9.9% of energy savings can be obtained by using of 1000 g/t of polyacrylic acid sodium salt. It was also found that the grinding aids reduced the shear stress and viscosity values of the pulp without changing the flow type. It was concluded that reduction in flow parameters of the pulp resulted in energy saving.

\* Sorumlu yazar: scayirli@ohu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0003-3348-6601>

\*\* sgokcen@ogu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5093-6796>

\*\*\* vbozkurt@ogu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0002-8617-5631>

\*\*\*\* yucbas@ogu.edu.tr • <https://orcid.org/0000-0001-5757-875X>

Bu makalenin tüm yayın hakları TMMOB Maden Mühendisleri Odası'na aittir © 2018 /

Copyright © 2018 Published by UCTEA Chamber of Mining Engineers of Turkey. All rights reserved.

## GİRİŞ

Mika farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip levhamsı, kompleks bileşimli hidroalüminyum-silikat minerallerine verilen isimdir. Muskovit, flogopit, biyotit ve lepidolit mika grubu içerisinde bilinen minerallerdir. Bu mineraller arasında muskovit  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(F,OH)_2$  mükemmel bir dilinimlenme (yapraksı yapı) gösteren, yumuşak ve elastik özelliğe sahip ince levhalara kolayca ayrılabilir (Chevalier, 2008). Günümüzde kullanılan mikaların çoğu mikronize formdadır ve en çok muskovit tercih edilmektedir. Özellikle, çevre açısından zararlı asbestlere alternatif bir malzeme olan mikronize mika kullanımı, endüstriyel hammadde dünyasındaki son gelişmelere bağlı olarak artmaktadır (Willett, 2012). Mikronize mika, izolatörlerde, plastikde dolgu malzemesi olarak, sedefli pigmentlerde, kaplamalar da, polimerlerde ve havacılık endüstrisinde kullanılan cihazlar gibi özel uygulamalara sahiptir. Başlıca kullanım alanları, kaplamalar, plastikler ve sondaj sıvılarıdır. Ülkemizde mikronize mika üretimi yapmaya uygun çok geniş mika yatakları bulunmaktadır (Cayirli vd, 2014).

Gelişen teknoloji ile birlikte ince boyutlu ürünlere olan gereksinimin ve düşük tenörlü cevherlerin değerlendirilmesinin zorunluluğu nedenleriyle ince ve çok ince öğütmenin önemi artmaktadır. Ancak, buna bağlı olarak, öğütmede tüketilen enerji miktarı da artmakta ve dolayısıyla cevher hazırlama maliyetleri de yükselmektedir (Somasundaran ve El-Shall, 1983; El-Shall ve Somasundaran, 1984; Dikmen ve Ergün, 2004). Fazla miktarda enerjinin verimsiz bir şekilde tüketildiği öğütme işlemlerinde yapılacak küçük iyileştirmelerin ne denli büyük ekonomik yararlar sağlayacağı açıktır. Öğütme işlemlerinde öğütme verimi artırılarak, enerji tüketimi bir miktar azaltılabilmektedir. Öğütme verimi de ya elde edilen ince boyutlu tanelerin hemen sistemden uzaklaştırılması (verimli sınıflandırma) ile ya da uygun öğütme yardımcılarının kullanılması ile artırılabilir. Bu nedenle, öğütme yardımcılarını kullanarak daha az enerji tüketimini amaçlayan birçok çalışma yapılmıştır.

Öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, ya belirlenen ürün inceliğinde kapasite artırılabilir ya da aynı kapasitede daha ince ürün elde edilebilmektedir (Jimenez, 1981; Austin vd, 1984; Orumwense ve Forssberg, 1992; Ber-

nhardt vd, 1999; Katsioti vd, 2009). Öğütme yardımcılarının öğütme üzerine olan olumlu etkileri kanıtlanmış olmasına rağmen, etki mekanizmaları tam olarak anlaşılammış ancak birkaç etki mekanizması ileri sürülmüştür (El-Shall ve Somasundaran, 1982). Bunlar; öğütme yardımcılarının tane yüzeyine adsorbe olması ile tane yüzeyindeki serbest enerjinin azalması (Rehbinder, 1931; Toprak vd, 2014), öğütme yardımcılarının yüzeye yakın düzensizliklere adsorbe olarak yüzeyin sertliğini değiştirmesi (Westwood ve Goldheim, 1968) ve öğütme yardımcılarının tane yüzeyine adsorbe olarak dağıtıcı rol oynaması ile tanelerin akışını arttırmasıdır (Rose ve Sullivan, 1958; Savage vd, 1974; Klimpel ve Manfroy, 1977; Hanna ve Gamal, 1977; Choi vd, 2009, 2010; Gokcen vd, 2015; Altun vd, 2015; Toprak vd, 2018). Yaş öğütme, kuru öğütmeden kullanılan enerji açısından daha verimli bir yöntem olduğundan, çoğu malzemelerin öğütülmesinde yaş öğütme tercih edilmektedir. Malzemelerin yaş öğütülmesi esnasında öğütme yardımcısı kullanıldığında yukarıdaki mekanizmalardan pülp akıcılığının daha etkili olduğu ileri sürülmektedir. Özellikle taneler 10 µm ve daha ince boyuta öğütüldüğünde (örneğin pigmentler), öğütme işleminin verimi tamamen pülp akıcılığıyla ilişkilendirilmektedir. Pülp akıcılığı, tane boyutu inceldikçe azalırken, sıcaklık ve pülpün katı oranındaki değişimler de pülp akıcılığını önemli ölçüde etkilemektedir. İnce öğütme işlemlerinde pülpün kontrolü için birkaç yöntem vardır. Bu yöntemlerin hepsinde kayma gerilmesi değerinin en aza indirilmesi ya da yok edilmesi amaçlanır. Bunun için ya düşük katı oranında malzemeler öğütülür ya da yüksek katı oranında pülp akıcılığı kontrolü amacıyla yaş öğütme yardımcılarını kullanılır (Özkan ve Yekeler, 2001). Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda öğütme yardımcılarının kullanılmasıyla, pülpün kayma gerilmesi değeri arttırılmaksızın pülp yoğunluğunun yükseltilebileceği ve böylece kapasitenin arttırılabileceği belirlenmiştir (Özkan ve Yekeler, 2001; Ateşok vd., 2005). Yaş öğütmede kullanılan bazı öğütme yardımcılarını şunlardır: sodyum silikat, sodyum heksametafosfat, tetrasodyum pyrofosfat, akrilik kopolimer, polikarboksilik asit, sodyum hidroksit, sodyum oleat, sodyum karboksimetilselüloz (Lowrison, 1979; El-Shall ve Somasundaran, 1984; Zheng vd, 1997; Wang ve Forssberg, 2007).

Literatürde birçok malzemenin farklı tip ufalama ekipmanlarında yaş öğütülmesinde akış özellikleri ortaya konmuştur. Muskovitin yaş öğütülmesi ile ilgili çok sınırlı sayıda araştırma olup, kullanılan öğütme kimyasalları ve öğütmede gösterdiği davranış hakkında çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, muskovitin karıştırmalı değirmende mikronize boyuta ( $d_{50}$  boyutu: 15  $\mu\text{m}$ ) yaş öğütülmesinde farklı cinsten (inorganik sodyum hegzametafosfat ve organik poliakrilik asit sodyum tuzu) ve miktarda (1000, 2000, 4000 g/t) öğütme yardımcılarının etkileri araştırılmıştır. Deney sonuçları, özgül enerji tüketimi (kWs/t) ve ürünlerin pülver akış özellikleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

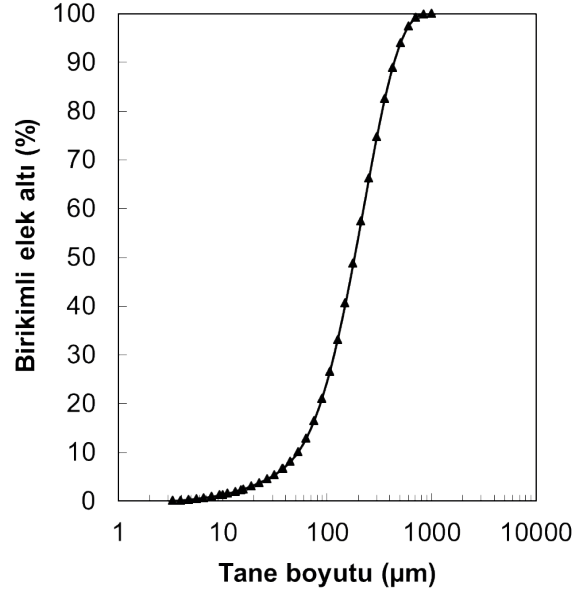
## 1. MALZEME VE YÖNTEM

### 1.1. Malzeme

Deneylerde Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'inden sağlanan ve boyut dağılımı Şekil 1'de verilen muskovit örneği kullanılmıştır. Tane boyut dağılımı ölçümü Malvern Mastersizer 2000 Model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi örneğin  $d_{50}$  boyutu 183  $\mu\text{m}$ 'dir. Örneğin Kaltun Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'de XRF cihazı ile yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Örnek, muskovitin yanında bir miktar albit ve kuvars içermektedir (Çizelge 1). Deneylerde, öğütme yardımcısı olarak sodyum hegzametafosfat (Aldrich Kimya, %65-70  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; SHMF) ve poliakrilik asit sodyum tuzu (Aldrich Kimya, Mw ~5100; PAASS) kullanılmıştır.

### 1.2. Yöntem

Deneyler Union Process 01-HD araştırma tipi kesikli karıştırmalı değirmende (atritör değirmen) gerçekleştirilmiştir. Değirmen bilgisayar kontrollü olup, öğütme esnasındaki veriler Mint Work Bench Programı ile (tork, karıştırma hızı ve tüketilen güç gibi) zamana bağlı olarak kayıt edilebilmektedir. Değirmende öğütücü ortamı karıştırmak için dikey bir şaft (plastik kaplı) ve bu şaft üzerine monte edilmiş 4 adet karıştırma kolu ( $\text{ZrO}_2$ ) vardır. Karıştırma kolunun uzunluğu 57,15 mm ve şaftın tank tabanından uzaklığı 6,35 mm'dir. Şaft 0,5 HP gücünde bir motora bağlı olup, şaftın dönme hızı 100-600 devir/dakika arasında değiştirilebilmektedir. Deneylerde, 8,06 cm çapında ve 12,15 cm yüksekliğinde alümina tank kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan değirmenin fotoğrafı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan örneğin tane boyut analizi

Çizelge 1. Örneğin kimyasal analizi

Muskovit	Miktar (%)
$\text{SiO}_2$	62,32
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22,75
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,85
$\text{TiO}_2$	0,33
CaO	0,88
MgO	1,23
$\text{Na}_2\text{O}$	2,81
$\text{K}_2\text{O}$	5,97
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,50
A.Z.	2,35



Şekil 2. Karıştırmalı değirmen, tankı ve şaftı

Öğütme deneyleri, daha önceki bir çalışmada belirlenen optimum koşullarda (Çizelge 2) gerçekleştirilmiştir (Çayırılı, 2014). Deneylerde izlenen yöntem şu şekildedir: şaft, tank içine yerleştirildikten sonra önce bilyalar tanka doldurulmuş, daha sonra istenilen miktarda su tanka ilave edilerek değirmen istenilen devirde çalıştırılmıştır. Son olarak öğütülecek kuru malzeme değirmene eklenmiş ve değirmen kapağı kapatılarak öğütme süresi başlatılmıştır. Deneyler,  $d_{50}$ 'si 15  $\mu\text{m}$  olan ürünler elde edilinceye kadar devam etmiştir. Her bir deneyde süreye bağlı olarak tork değerleri kaydedilmiş ve ölçülen torkların ortalaması alınarak özgül enerji tüketimi Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmıştır. Deneyler sonunda bilyalar ve malzeme öğütme tankından dışarıya alınmış ve bir elek yardımıyla malzemenin bilyalardan ayrılması sağlanmıştır. Elde edilen malzemenin kurutulduktan sonra Malvern Mastersizer Hydro 2000 kullanılarak boyut analizleri yapılmış ve pülp akış özellikleri incelenmiştir.

Çizelge 2. Öğütme deney koşulları

Karıştırma hızı (d/dk.)	600
Bilya doluluk oranı	0,72
Boşluk doldurma oranı	0,58
Yüzde Katı (% ağırlıkça)	45
Bilya tipi	Alümina
Bilya çapı (mm)	5
Öğütme yardımcısı cinsi	SHMF/PAASS
Öğütme yardımcısı miktarı (g/t)	0/1000/2000/4000

$$E = \frac{94,83 * \text{Tork (Nm)} * \text{Hız(d/dk)} * \text{Süre(sa)}}{\text{Örnek miktarı (gram)}} \quad (1)$$

E=Enerji tüketimi (kWs/t) (Jimenez, 1981).

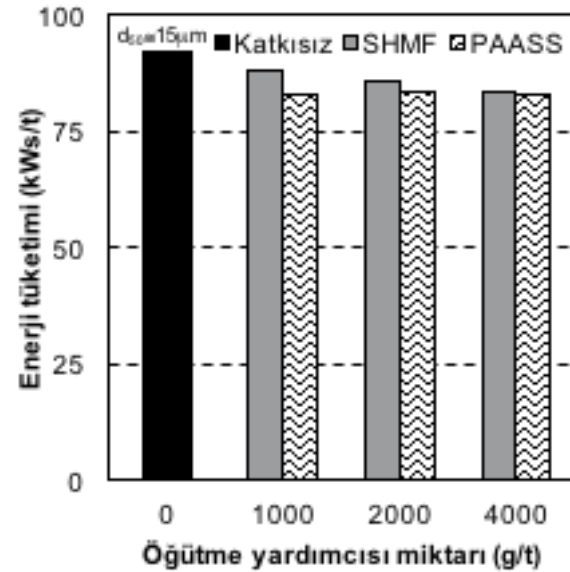
Malzemenin pülp akış özelliklerinin belirlenmesinde Malvern marka Bohlin CVO-100 model reometre cihazında, C25(DIN) boyutlu ortak eksenli silindir (Coaxial cylinders, cup and bob) düzeneği kullanılmıştır. Ölçüm işlemi, ağırlıkça %45 katı oranında hazırlanan pülpün 7 dakika manyetik karıştırıcı ile karıştırılmasından sonra bir şırınga ile reometre cihazının ölçüm haznesine aktarılmasıyla başlamaktadır. Tanelerin çökme etkisinin azaltılması amacıyla yüksek kayma hızlarından düşük kayma hızlarına doğru ölçümler yapılmış ve her ölçüm öncesinde 10 saniye 1000  $\text{s}^{-1}$  kayma hızında ön karıştırma yapılmış ve 5 saniye beklendikten

sonra ölçümlere başlanmıştır. Ölçümler kayma hızı kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 1 ile 1000  $\text{s}^{-1}$  kayma hızları arasında 40 adet hız değeri alınarak kayma gerilmesi ve viskozite değerleri kaydedilmiştir. Tüm ölçümler 25°C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

## 2. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

### 2.1. Özgül Enerji Tüketimi Üzerine Etkisi

Öğütme yardımcısı cinsi ve miktarının,  $d_{50}$ 'si 15  $\mu\text{m}$  boyutlu ürünlerin elde edilmesindeki enerji tüketimlerine etkileri Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3 incelendiğinde öğütme yardımcısı kullanılmadığında  $d_{50}$  boyutu 15  $\mu\text{m}$  olan bir ürün 92,22 kWs/t enerji tüketimi ile elde edilirken, aynı boyutlu bir ürün 4000 g/t sodyum hegzametafosfat kullanıldığında 82,62 kWs/t enerji tüketimi ile elde edilebilmektedir. Sodyum hegzametafosfat kullanımı ile enerji tüketimi %10,4 azalmıştır.



Şekil 3. Öğütme yardımcısı cinsi ve miktarının enerji tüketimi üzerine etkisi ( $d_{50}$ : 15  $\mu\text{m}$ )

Poliakrilikasit için de durum benzerdir. Poliakrilikasit kullanılmadığında  $d_{50}$  boyutu 15  $\mu\text{m}$  olan bir ürün 92,22 kWs/t enerji tüketimi ile elde edilirken, aynı boyutlu bir ürün 1000 g/t poliakrilikasit kullanıldığında 83,12 kWs/t enerji tüketimi ile elde edilebilmektedir. Poliakrilikasit kullanımı ile enerji tüketimi %9,9 azalmıştır. Poliakrilikasit miktarının artırılmasının, enerji tüketimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı Şekil 3'de görülmektedir.



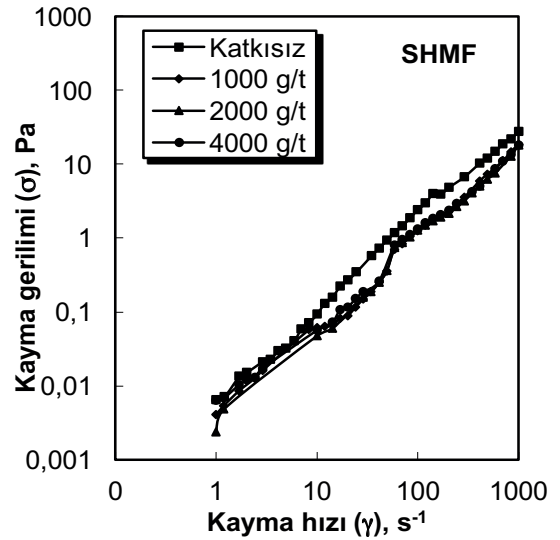
İnorganik sodyum hegzametafosfatın 4000 g/t kullanılmasından elde edilen sonuçlar ile organik poliakrilikasinin 1000 g/t kullanılmasıyla elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olması, organik öğütme yardımcılarının inorganik öğütme yardımcılara göre daha etkin olduğunu göstermektedir. Bazı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlara varılmıştır (Zheng vd, 1997; He vd, 2004; He vd, 2006).

Süspansiyonlarda taneler arasındaki van der Waal's çekim kuvvetleri ile elektrostatik ve sterik (organik esaslı dağıtıcı kullanıldığında) itme kuvvetleri en önemli kuvvetlerdir. Van der Waals çekim kuvvetleri ince tane boyutlarında (özellikle  $<1 \mu\text{m}$ ) çok etkilidir ve taneleri bir araya getirmeye çalışır. Bu kuvvetlerin pülpde etkin olması durumunda pülpün viskozitesi ve dolayısıyla değirmen tarafından çekilen güç artar. Tanelerin yüzey yükünden kaynaklanan elektrostatik ve tanelerin yüzeyine adsorbe olan organik gruplardan kaynaklanan sterik itme kuvvetleri ise tanelerin bir araya gelmesini önlemeye çalışır. Bu itme kuvvetleri gerekirse öğütme yardımcılarını kullanarak artırılabilir ve böylece tanelerin bir araya gelmesi engellenerek daha verimli bir öğütme için pülpün akışkanlığı iyileştirilebilmektedir (Klimpel, 1999; Toraman, 2015). Öğütme yardımcısı bulunmaması durumunda süspansiyonların stabilizasyon mekanizması DLVO (Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek) teorisi ile açıklanmaktadır (He vd, 2004).

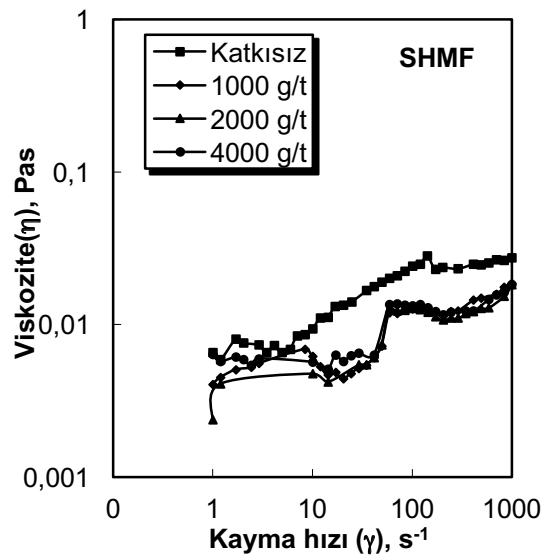
## 2.2. Pülp Akış Özellikleri Üzerine Etkisi

Öğütme yardımcısı cinsi ve miktarının öğütülmüş muskovitin pülp akış özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla bir grup deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde, öğütme yardımcısının katıldığı ve katılmadığı tüm ürünlerin dilatant akış tipine uyduğu görülmektedir. Ayrıca, tüm kayma hızlarında, öğütme yardımcısı kullanılması durumunda pülpün kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, öğütme yardımcısı cinsi ve miktarının, pülpün akış özellikleri üzerine etkisinin çok belirgin olmadığı görülmektedir. Mevcut çalışma %45 katı konsantrasyonun da gerçekleştirilmiş olup, daha yüksek katı konsantrasyonlarında öğütme yardımcılarının denenmesiyle etkilerin daha net ortaya konabileceği düşünülmektedir.

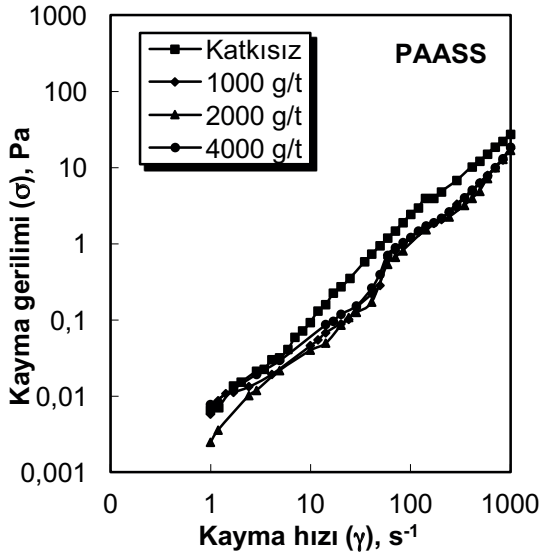
Bazı araştırmacılar, öğütme yardımcılarının pülpün görünür viskozitesini düşürdüğünü (He vd, 2006) ve pülpün kayma gerilmesini azalttığını (Klimpel, 1999) ileri sürmüşlerdir. Öte yandan sıcaklık, pH, tane boyutu ve dağıtıcı molekül ağırlığının da akış üzerine etkisinin olduğu göz ardı edilmemelidir (Zheng vd, 1997; Reinisch vd, 2001; Zhou vd, 2001; Yue ve Klein, 2004). Bu çalışmada elde edilen bulgular, öğütme yardımcılarının kullanımıyla, akış özelliğinin değişmediğini ancak, kayma gerilmesi ve viskozite değerlerinin azaldığını göstermiştir.



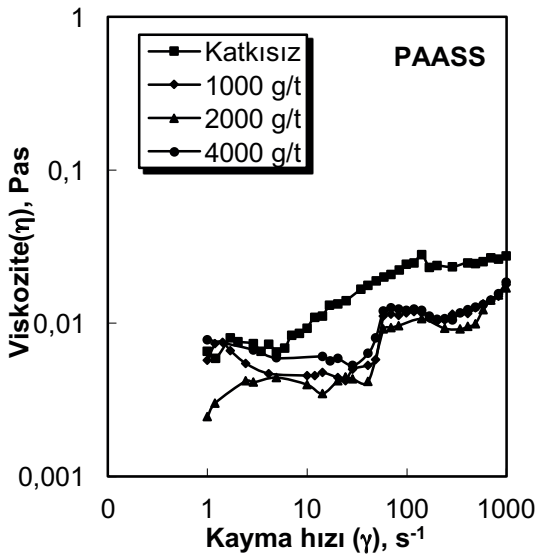
Şekil 4. Kayma geriliminin kayma hızına bağlı değişimi (Sodyum hegzametafosfat)



Şekil 5. Viskozitenin kayma hızına bağlı değişimi (Sodyum hegzametafosfat)



Şekil 6. Kayma geriliminin kayma hızına bağlı değişimi (Poliakrilik asit sodyum tuzu)



Şekil 7. Viskozitenin kayma hızına bağlı değişimi (Poliakrilik asit sodyum tuzu)

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, muskovitin karıştırmalı değirmende yaş öğütülmesinde öğütme yardımcısı kullanımının enerji tüketimi ve ürün pülp akış özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

► Karıştırmalı değirmende muskovitin yaş öğütülmesinde öğütme yardımcısı olarak inorganik ve organik kimyasallar kullanıldığında, enerji tük-

retiminden yaklaşık %10 tasarruf sağlanmıştır. Aynı hedef ürün boyutu için kullanılan inorganik öğütme yardımcısı (sodyum hegzametafosfat) miktarının, organik öğütme yardımcısı (poliakrilik asit sodyum tuzu) miktarından 4 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir, bu da organik öğütme yardımcılarının daha etkin öğütme yardımcısı olduğunu göstermektedir.

► Öğütme yardımcılarının cinsi ve miktarının dilatant olan akış tipini değiştirmedeği, ancak pülpün kayma gerilmesi ve viskozite değerlerini azalttığı tespit edilmiştir. Akış parametrelerindeki bu azalışın enerji tasarrufunun nedeni olduğu sonucuna varılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmaya sağladıkları katkılardan dolayı TÜBİTAK'a (Proje no. 112R008) ve Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na (Proje no. 2013-175) teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- Altun O., Benzer H., Toprak A., Enderle U., 2015. Utilization of Grinding Aids in Dry Horizontal Stirred Milling. Powder Technology, 286, 610-615.
- Ateşok, G., Mütevelioğlu, N. A., Dinçer, H., Boylu, F., 2005. Bazı Dağıtıcı Kimyasalların Kömürlerin Öğütülebilirliğine Etkisi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 44(2), 25-35.
- Austin, L.G., Klimpel, R. R., Luckie, P. T., 1984. Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling. SME, New York, 561 p.
- Bernhardt, C., Reinsch, E., Husemann, K., 1999. The Influence of Suspension Properties on Ultra-Fine Grinding in Stirred Ball Mills. Powder Technology, 105, 357-361.
- Cayirli, S., Gokcen, H.S., Ucbas, Y., Kayaci, K., 2014. Fine Grinding of Mica. 14<sup>th</sup> International Mineral Processing Symposium. Kuşadası, Turkey, 39-43.
- Chevalier, M.D., 2008. Effect of Microwave Irradiation on Aspect Ratio of Treated Mica. M.Sc. Thesis, Dalhousie University, Nova Scotia, Canada.

- Choi, H., Lee, W., Kim, S., 2009. Effect of Grinding Aids on the Kinetics of Fine Grinding Energy Consumed of Calcite Powders by a Stirred Ball Mill. *Adv. Powder Technol.*, 20(4), 350–354.
- Choi, H., Lee, W., Kim, D.U., Kumar, S., Kim, S.S., Chung, H.S., Kim, J.H., Ahn, Y.C., 2010. Effect of Grinding Aids on the Grinding Energy Consumed during Grinding of Calcite in a Stirred Ball Mill. *Miner. Eng.*, 23(1), 54–57.
- Çayırılı, S., 2014. Mikanın Karıştırmalı Bilyalı Değirmende Öğütülmesinde Öğütme Parametrelerinin Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Ü. Fen Bil. Ens., 160 s.
- Dikmen, S., ve Ergün, Ş.L., 2004. Karıştırmalı Bilyalı Değirmenler. *Madencilik Dergisi*, 43(4), 3-15.
- El-Shall, H., Somasundaran, P., 1982. Mechanisms of Grinding Modification by Chemical Additives: Organic Reagents. Annual Meeting of AIME, Dallas, Texas, 22 p.
- El-Shall, H., Somasundaran, P., 1984. Physico-Chemical Aspects of Grinding: A Review of Use of Additives. *Powder Technology*, 38, 275-293.
- Gokcen, H.S., Cayirli, S., Ucbas, Y., Kayaci, K., 2015. The Effect of Grinding Aids on Dry Micro Fine Grinding of Feldspar. *International Journal of Mineral Processing*, 136, 42-44.
- Hanna, K. M., Gamal, A. E., 1977. The Effect of Dispersing Agents on Fine Grinding of Limestone. *Powder Technology*, 17(1), 19-25.
- He, M., Wang, Y., Forssberg, E., 2004. Slurry Rheology in Wet Ultrafine Grinding of Industrial Minerals: A Review. *Powder Technology*, 147, 94–112.
- He, M., Wang, Y., Forssberg, E., 2006. Parameter Effects on Wet Ultrafine Grinding of Limestone through Slurry Rheology in a Stirred Media Mill. *Powder Technology*, 161(1), 10-21.
- Jimenez, J. L. S., 1981. A Detailed Study on Stirred Ball Mill Grinding. Ph.D. Dissertation, Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah, 211 p.
- Katsioti, M., Tsakiridis, P.E., Giannatos, P., Tsi-bouki, Z., Marinos, J., 2009. Characterization of Various Cement Grinding Aids and their Impact on Grindability and Cement Performance. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1954-1959.
- Klimpel, R., Manfroy, W., 1977. Development of Chemical Grinding Aids and their Effect on Selection-for-Breakage and Breakage Distribution Parameters in the Wet Grinding of Ores. XIIth Int. Min. Proc. Cong., Sao Paulo, Brazil.
- Klimpel, R. R., 1999. The Selection of Wet Grinding Chemical Additives based on Slurry Rheology Control. *Powder Technology*, 105, 430–435.
- Lowrison, G. C., 1979. *Crushing and Grinding*. CRC Press Inc., Cleveland, OH, 60 p.
- Orumwense, O. A., Forssberg, E., 1992. Superfine and Ultrafine Grinding - A Literature Survey. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 11, 107-127.
- Özkan, A., Yekeler, M., 2001. Palp Reolojisinin Öğütme İşlemine Etkisi ve Kontrolü. *Madencilik Dergisi*, 40(1), 40-47.
- Rehbinder, P. A., 1931. Hardness Reduction through Adsorption of Surface Active Agents. *Physik, V.*, 72, 191-205.
- Reinisch, E., Bernhardt, C., Husemann, K., 2001. The Influence of Additives during Wet Ultra-Fine Grinding in Agitator Bead Mills: Part 1. General Principles and Experimental. *Ceramic Forum International: Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*, 78(3), E38-E42.
- Rose, H. E., Sullivan, R. M. E., 1958. *A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube, and Rod Mills*. Chemical Publishing Company, New York, NY.
- Savage, K. I., Austin, L. G., Sun, S. C., 1974. Effect of the Environment during the Ultrafine Comminution of Silicon Carbide in a Laboratory Vibratory Mill. *Trans. AIME*, 225, 89-96.
- Somasundaran, P., El-Shall, H., 1983. Mechanochemical Effects in Ultrafine Grinding. SME-AIME, Annual Meeting, Atlanta, Georgia.
- Toprak, N.A., Altun, O., Aydogan, N., Benzer, H., 2014. The Influences and Selection of Grinding Chemicals in Cement Grinding Circuits. *Construction and Building Materials*, 68, 199-205.
- Toprak, N.A., Altun, O., Benzer, H., 2018. The Effects of Grinding Aids on Modelling of Air Clas-

sification of Cement. Construction and Building Materials, 160, 564-573.

Toraman, O. Y., 2015. Karıştırmalı Bilyalı Değirmende Çok İnce Yaş Öğütme: Bölüm: II. Palp Reolojisi ve Duraylılık. Madencilik, 54(1), 25-36.

Wang, Y., Forssberg, E., 2007. Enhancement of Energy Efficiency for Mechanical Production of Fine and Ultra-Fine Particles in Comminution. China Particuology, 5, 193-201.

Westwood, A. R. C., Goldheim, D. L., 1968. Occurrence and Mechanism of Rehbinder Effects in  $\text{CaF}_2$ . J. Appl. Physics, 39(7), 3401-3405.

Willett, J.C., 2012. Mica. Minerals Yearbook, USGS.

Yue, J., Klein, B., 2004. Influence of Rheology on the Performance of Horizontal Stirred Mills. Minerals Engineering, 17, 1169–1177.

Zheng, J., Harris, C. C., Somasundaran, P., 1997. The Effect of Additives on Stirred Media Milling of Limestone. Powder Technology, 91, 173-179.

Zhou, Z., Scales, P. J., Boger, D. V., 2001. Chemical and Physical Control of the Rheology of Concentrated Metal Oxide Suspensions. Chemical Engineering Science, 56, 2901-2920.