



## Farklı barit cevherlerinin konvansiyonel değirmenlerde bazı öğütme özelliklerinin belirlenmesi

### Determination of the some grinding properties of different barite ores by conventional mills

Güler Bayar<sup>1,\*</sup> , Meftuni Yekeler<sup>2</sup> 

<sup>1,2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

#### Öz

Farklı kompozisyonlardaki barit cevheri numuneleri konvansiyonel değirmenlerle kuru öğütülerek tane boyut dağılımları elde edilmiştir. Safa yakın ve gang içeren numuneler bilyalı ve çubuklu ortamlarda öğütülerek elde edilen ürünler farklılıklar göstermiştir. Dört farklı barit cevheri öğütme testlerine tabi tutulmuş olup, yüksek BaSO<sub>4</sub> tenörlü B1 ve B2 numuneleri, bilyalı değirmende 8 dakika, çubuklu değirmende 3 dakika öğütülmeye -212 µm tane boyut fraksiyonunu vermiştir. Diğer taraftan, düşük BaSO<sub>4</sub> tenörlü B3 ve B4 gibi gang içerikli (çoğunlukla kuvars içeren) barit cevher numuneleri ise bilyalı değirmende 16 dakika, çubuklu değirmende 6 dakika öğütülmeye -212 µm tane boyut fraksiyonunu vermiştir. Değirmenlerde yavaşlama etkisi olayına sebep olan ince tanelerin artması, safa yakın barit numunelerinde (B1 ve B2) daha kısa öğütme sürelerinde rastlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Barit, Öğütme, Bilyalı değirmen, Çubuklu değirmen, Yavaşlama etkisi

#### 1 Giriş

Barit, baryum elementinin en yaygın minerali olan baryum sülfatı (BaSO<sub>4</sub>). Metalik olmayan minerallerin en ağır olan barit, yüksek yoğunluğa (4.45-4.5 gr/cm<sup>3</sup>) sahiptir [1]. Aynı zamanda, X ışınlarına karşı opaklığı, inertliği ve beyazlığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan önemli bir inorganik kimyasal üründür [2]. Az aşındırıcı olması (Moh's 3-3.5), yüksek ısı ve basınç altında kimyasal sabitliğini koruması, su ve asitlerde düşük çözünürlüğü önemli avantajları arasındadır. Manyetik özelliğinin olmaması ve uygun maliyetlerde temini onun çeşitli endüstrilerde de giderek yaygın şekilde kullanımını sağlamıştır [3].

Endüstriyel minerallerden, önemli olan barit minerali, kullanıldığı sektörde bazında ele alındığında en yüksek pazar payını sondaj çamurunda kullanımı ile almaktadır. Bu nedenle, ince öğütülmesinin kaçınılmaz olduğu bilinmektedir. Sektörel anlamda en yüksek pazar payı, sondaj çamuru olmasına karşın küçük ölçekli olarak, kimyasal, cam, kauçuk, boya vb. gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadır [4]. Bu pazar, dolgu malzemesi, kimyasallar ve seramikler olarak üç ana uygulamadan

#### Abstract

The particle size distributions of the different barite ore samples were obtained by dry grinding in the conventional mills. The ball media and rod media produced different products for nearly pure barite and the gang associated barite samples. Four different barite samples were subjected to grinding tests. The -212 µm size fraction was obtained for high BaSO<sub>4</sub> grade barite samples of B1 and B2 at 8 minutes from the ball media and 3 minutes from the rod media employed. On the other hand, the same size fraction was obtained for the low BaSO<sub>4</sub> grade samples that contained gang minerals (mostly quartz) of B3 and B4 at 16 minutes for the ball media and at 6 minutes for the rod media. The slowing down effect which is caused by fine particles accumulation in the mills was reached at shorter grinding times for the high grade barite samples of B1 and B2

**Keywords:** Barite, Grinding, Ball mill, Rod mill, Slowing down effect.

oluşmaktadır. Barit endüstrisinin bu yönlerinin derinlemesine incelemeleri, [5-8] tarafından yapılmıştır.

Brobst [6] tarafından barit cevherlerinde gang mineralleri olarak yer alan başlıca safsızlıklar olarak, kuvars, kalsit, siderit, selestit, fluorit, çört, demirli kil ve çeşitli sülfür mineralleri (pirit, kalkopirit, galen, sfalerit vb.) olduğu belirtilmiştir.

Cevher içerisinde bulunan safsızlıklara göre farklı fiziksel özellik göstermektedir. Kütlece yüzde safsızlık değerine göre Mohs sertliği, saydamlığı gibi özellikleri saf cevhere göre farklılık gösterebilmektedir. Baritin çoğu öğütülerek, sanayi ürünlerinde katkı malzemesi, petrol veya doğalgaz kuyularını açarken ağırlık yapması için kullanılır. MTA'nın 2017 verilerine göre, Türkiye'deki barit rezervi görünür + muhtemel olarak 34.222.792 tondur [9]. Ülkemizin sahip olduğu bu önemli barit rezervi genellikle sondaj çukuru açma işlemlerinde kullanılmakta, yüksek katma değere sahip ürünlere dönüştürülmeden ihraç edilmektedir. Bu durum, öğütme işlemlerini, barit cevherleri için daha da önemli hale getirmektedir.

Öğütme bir maden işletmesinin, maliyetlerinin yaklaşık % 30-50'sini oluşturmaktadır [10-11]. Öğütme işlemlerinde

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gbayar @ cumhuriyet.edu.tr (G. Bayar)

Geliş / Recieved: 30.09.2021 Kabul / Accepted: 18.03.2022 Yayınlanma / Published: 15.04.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1001793

enerji ihtiyacı yüksektir. Minerallerin öğütülmesinde çok sayıda değirmen imalatçısı ve birkaç farklı değirmen tipi bulunmaktadır. Ama tüm bu alternatifler arasında doğru seçim yapmak ciddi bir sorundur [12]. İnce öğütme büyük miktarda enerji tükettiğinden ve yüksek aşınmaya neden olabileceğinden, güncel araştırmaların çoğu bu bilimsel ve teknik sorunlara odaklanmıştır [13].

İnce öğütmede en yaygın kullanılan değirmen tipi konvansiyonel bilyalı değirmenlerdir. Ancak, bilyalı değirmende kullanılan en küçük bilya boyutu 25 mm olmasından dolayı, değirmen içindeki çarpma hareketlerinden öğütülen cevhere aktarılacak enerji, küçük boyutlarda küçültme için yeterli olmamaktadır. Küçük partiküllerin ufalanmasında basınç ve kesme kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmende öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenin ekonomik öğütme sınırları 100 µm'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenin spesifik enerjileri üstel olarak artış göstermektedir [14]. Bilyalı değirmende öğütme, bilyaların cevher partikülleri ile noktasal teması sonucunda gerçekleşmektedir. Yeterli süre verilmesi durumunda bu değirmenler ile istenilen incelikte ürün alınabilmektedir. Bu yüzden bilyalı değirmen ile 50 mikronun altına öğütme yapmak mümkündür. Çubuklu değirmene göre daha ince ürün veren bu değirmende boyun çapa oranı 1 ile 1.5 arasında değişmektedir. Genel olarak ince öğütmelerde değirmenin boyu daha uzundur. Çubuklu değirmende, malzeme çubukların arasında bir hat boyunca öğütüldükleri için daha homojen ürünler elde edilirken, çubuklar arası boşluklar diğer konvansiyonel değirmen tiplerine göre daha az olduğundan öğütme verimi daha yüksek olmaktadır [15].

Kuru öğütme uygulamaları kimya endüstrisi, mineral endüstrisi ve çimento üretimi için oldukça önemlidir. Ayrıca öğütme işlemlerinde değirmende çoğalan ince partiküllerin artması nedeniyle, öğütme zorlaşmakta ve hatta durmaktadır [16]. Değirmen içerisindeki kırılma davranışı cevherlerde belirli bir sürenin sonunda doğrusallıktan uzaklaşarak sapma göstermektedir. Bu duruma kırılma yapıda olmayan çimento klinkerlerinin birkaç saat öğütüldükten sonra daha fazla boyut küçültmenin sağlanmadığı örnek olarak gösterilebilir. Bazı araştırmacılar [17], bu durumu yavaşlama etkisi (slowing down effect) teorisi ile açıklamışlardır. Bu durum, öğütme süresinin artışı ile ortamda ince partiküllerin artması ve bunların yastıklama etkisi oluşturmasıyla açıklanabilir. Yastıklama etkisi, ince partiküllerin iri partiküllerin etrafını sarması ve öğütmeyi olumsuz yönde etkilemiş olmasıdır. Bu olumsuzluk nedeniyle birinci dereceden doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmakta, kırılma hızı azalmaktadır. Dolayısıyla da öğütme için harcanan enerji sarfiyatı ne kadar devam ederse etsin, öğütücü ortamda öğütmenin yavaşladığı ve hatta daha ileriki sürelerde durduğu öngörülmektedir. Bilyalı ve çubuklu değirmende yavaşlama etkisinin, istenen partikül boyutunu elde etmek ve enerjinin verimli kullanılması için ne zaman başladığı oldukça önemlidir.

Yapılan bir çalışmada barit mineralinin, 2 dakikalık öğütme işleminden sonra yavaşlama etkisi gösterdiğini belirtmiştir. Kullandıkları barit numunelerinin kimyasal

kompozisyonlarının, bu çalışmada kullanılan B1 ve B2 numunelerine benzer olduğu ve yavaşlama etkisinin de, benzer özellikler gösterdiği görülmektedir [18].

Özkan vd.'nin [19] yaptıkları bir çalışmada barit numunelerinin seramik bilyalı öğütücülerde kuru öğütülmesi sonucu yavaşlama etkisinin 4 dakika sonra başladığını göstermiştir.

Bu çalışmada, mineral endüstrisinde boyut küçültmede yaygın olarak kullanılan bilyalı ve çubuklu değirmenlerde farklı BaSO<sub>4</sub> tenörlerindeki barit cevherlerinin öğütülmesi sonucu hedeflenen (-212µm) partikül boyut dağılımının öğütme sürelerine bağlı olarak değişimini belirlemek ve ince öğütmede verimsizliğe neden olan yavaşlama etkisinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

## 2 Materyal ve metod

### 2.1 Materyal

Çalışmalarımızda kullanılan barit cevherleri Sivas yöresinden temin edilmiştir. Ocağın farklı bölgelerinden alınan dört ayrı barit numunesi farklı kimyasal bileşene ve farklı tenörlere sahiptir. Bilyalı ve çubuklu değirmenle yapılan öğütme testlerinde kullanılan barit cevherlerinin (B1, B2, B3 ve B4) kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneilerde kullanılan barit cevherlerinin kimyasal kompozisyonları

Mineral Adı	Bileşen	Ağırlık Oranı (%)
B1	BaSO <sub>4</sub>	95.52
	SiO <sub>2</sub>	0.021
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.35
	Özgül Ağırlık	4.37 g/ml
B2	BaSO <sub>4</sub>	79.82
	SiO <sub>2</sub>	5.12
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.41
	Özgül Ağırlık	3.98 g/ml
B3	BaSO <sub>4</sub>	59.72
	SiO <sub>2</sub>	34.91
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.23
	Özgül Ağırlık	3.57 g/ml
B4	BaSO <sub>4</sub>	58.36
	SiO <sub>2</sub>	36.81
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.93
	Özgül Ağırlık	3.54 g/ml

Öğütme işlemleri bilyalı ve çubuklu değirmende, farklı sürelerde yapılmış, elde edilen ürünler, 600 µm, 425 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 75 µm, 53 µm, 38 µm boyutları içeren elek setinden yaş olarak elenerek partikül boyut dağılımları elde edilmiştir. Eleme süresi, yapılan eleme kinetiği çalışmaları ile 10 dk olarak belirlenmiş ve tüm eleme işlemlerinde bu eleme süresi kullanılmıştır.

### 2.2 Metod

Öğütme, öğütücü ortam, değirmen çepri ve malzeme arasındaki temasın bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle, öğütücü ortamında, öğütücü ortam ve değirmen

çeperi, öğütücü ortam ve partiküller, partiküller ve değirmen çeperi arasında ve birden çok partikül arasında çarpışmalar meydana gelebilir [20]. Öğütme işlemi, partiküllerle öğütücü ortam (çubuk, bilya veya çakıl) arasındaki göreceli hareket ile oluşmaktadır. Bu hareket, öncelikle çarpma sonucu oluşan kırılma veya birincil olarak ezilme ve aşındırmanın neden olduğu kırılma olarak karakterize edilebilir [21].

Bu çalışmada, ocaktan gelen tüvenan cevher, çeneli kırıcıda -2.5 cm'ye kırılmış ve öğütme testleri de bu boyut fraksiyonu ile yapılmıştır.

Cevher numunelerinin öğütme testleri, bilyalı ve çubuklu değirmende ve öğütme koşulları, Tablo 2'de verilen şartlarda yapılmıştır. Öğütme deneylerinin tamamı kuru yapılmıştır.

Ocaktan gelen ve farklı kompozisyonlara sahip olan numuneler, bilyalı ve çubuklu değirmende farklı sürelerde öğütülerek, hem ince boyutta malzemelerin (-212µm) elde edilmesi için gerekli öğütme süreleri hem de öğütmede yavaşlama etkisi belirlenmiştir. Bilyalı değirmende, numuneler sırasıyla 1, 2, 4, 8, 16, 32 dakika öğütülerek hedeflenen partikül boyutu için gerekli öğütme süresi bulunmuştur. Çubuklu değirmende öğütmenin daha hızlı olduğu gözlemlendiğinden, B1 ve B2 için öğütme süreleri 1, 2, 3, 4 ve 7 dakika, B3 ve B4 için 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 dakikalık sürelerle öğütme işlemi yapılmıştır. Öğütme işlemlerine ait partikül boyut dağılımları Şekil 1-8'de verilmiştir.

### 3 Bulgular ve tartışma

#### 3.1 B1 numunesinin öğütme testleri

BaSO<sub>4</sub> içeriği en yüksek olan (% 95.52) B1 numunesinin bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme

deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 1 ve 2'de verilmiştir.

Numuneler için öğütme sonucunda ürünlerin 212 µm tane boyutundan en az %80'inin geçtiği öğütme süresi istenilen öğütme süresi olarak kabul edilmiştir.

B1 numunesinin özellikle çubuklu değirmende öğütülmesi testlerinde, 3 dakikalık öğütme süreleri sonunda elde edilen partiküllerin boyut fraksiyonları, beslenenin boyut fraksiyonuna kıyasla oldukça ince ürün vermiştir. Bu nedenle öğütme daha kısa aralıklarla ve bilyalı değirmene göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, B1 numunesinin öğütme sonuçları değerlendirildiğinde; bilyalı değirmende 8 dakika öğütme ile malzemenin % 81.31'inin, çubuklu değirmende ise 3 dakika öğütme ile malzemenin %94.33'ünün 212 µm'nin altına geçtiği belirlenmiştir.

#### 3.2 B2 numunesinin öğütme testleri

Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 3 ve 4'de verilmiştir.

B2 numunesi kimyasal kompozisyon ve tenör bakımından B1 baritleriyle yakın özellikler gösterdiğinden öğütme işlemlerinde de benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Yapılan bir çalışmada, % 98 içerikli ve kuvarstan oluşan barit örneklerinde baritin kolay kırıldığı belirtilmektedir[22].

B2 numunesinin, bilyalı değirmende 3 dakika öğütme ile malzemenin % 86.02'sinin, çubuklu değirmende ise 3 dakika öğütme ile malzemenin %87.96'sının 212 µm'nin altına geçtiği görülmüş olup B1 numunesi ile çok yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

**Tablo 2.** Bilyalı ve çubuklu değirmen özellikleri ve deney koşulları

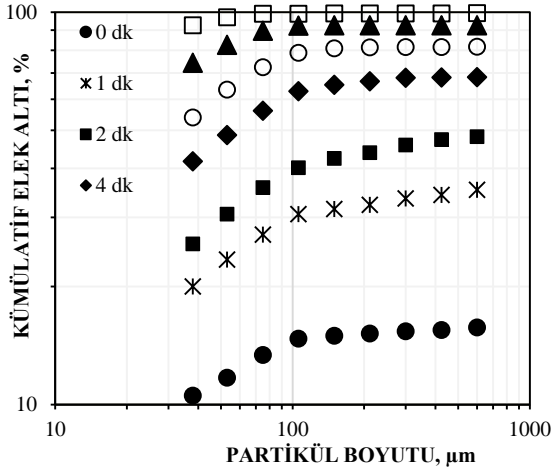
	Parametreler	Bilyalı Değirmen	Çubuklu Değirmen
Değirmen	İç çapı (D), mm	198	214
	Uzunluğu (L), mm	200	300
	Hacmi (V), cm <sup>3</sup>	6155	9046,97
	Kritik Hız,(N <sub>c</sub> ), d/d	103 <sup>a</sup>	95.55 <sup>a</sup>
	Çalışma Hızı (N), d/d	77	59.71
Ortam	Malzemesi	Çelik alaşım	Çelik alaşım
	Ortalama bilya çapı (d), mm	31	19.81(9adet); 24.71(4adet); 29.84(3adet)
	Sayısı, adet	45	16
	Özgül ağırlık, gr/ cm <sup>3</sup>	7.8	7.8
	Toplam bilya şarjı, g	5761	16848
	Bilya şarjı, J	0.2 <sup>b</sup>	0.3 <sup>b</sup>
	Besleme miktarı, g	642.60	972
Mineral (Barit)	Dolum oranı, f <sub>c</sub>	0.04 <sup>c</sup>	0.04 <sup>c</sup>
	Malzeme bilya doluluk oranı, U	0.5 <sup>d</sup>	0.5 <sup>d</sup>
$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D-d}} \cdot \frac{d}{d}, \quad J = \frac{\text{Bilya Ağırlığı/Bilya Yoğunluğu}}{\text{Değirmen Hacmi}} * \left(\frac{1.0}{0.6}\right), \quad f_c = \frac{\text{Mineral Şarj Miktarı/Mineral Yoğunluğu}}{\text{Değirmen Hacmi}} * \left(\frac{1.0}{0.6}\right), \quad U = \frac{f_c}{0.4 * J}$			

### 3.3 B3 numunesinin öğütme testleri

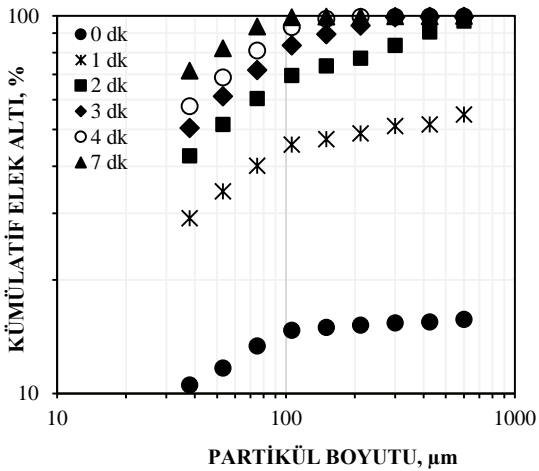
Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.

B3 numunesinde, bilyalı değirmende 16 dakika öğütme ile malzemenin % 79.93'ü (~%80), çubuklu değirmende ise 6 dakika öğütme ile malzemenin %83.17'si 212 µm'nin altına geçmiştir. Bu durum, barit numunelerinin içerisindeki safsızlıklardan olan kuvars mineral içeriğinin artmasıyla malzemenin daha zor kırıldığını göstermektedir.

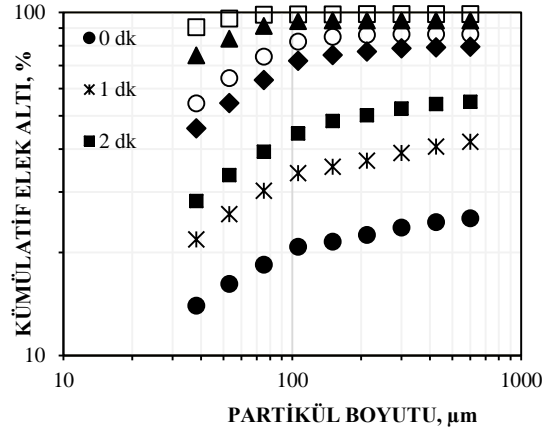
Yekeler vd. [23], yaptıkları bir çalışmada barit mineralini, diğer endüstriyel minerallerden olan kuvars minerali ile karşılaştırmış ve baritin kuvarsa göre daha çabuk öğütülebilir olduğunu göstermiştir. Barit için elde edilen özgül kırılma hızı ( $S_i$ ) değeri  $-850+600\mu\text{m}$  için  $0.99 \text{ dk}^{-1}$  iken, kuvars için bu değer  $0.51 \text{ dk}^{-1}$  olarak belirlenmiş ve baritin daha çabuk ve kırılabilir bir yapıya sahip olduğu vurgulanmıştır.



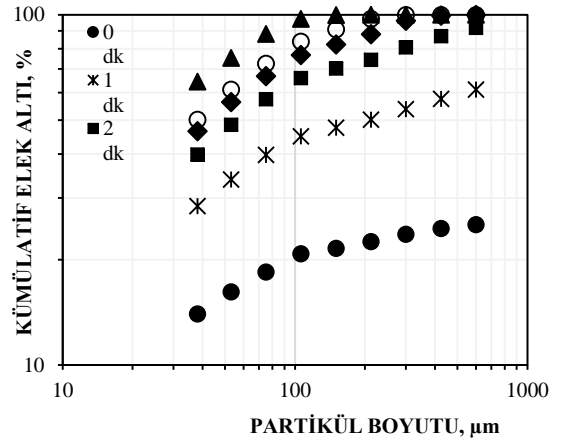
Şekil 1. Bilyalı değirmende öğütülmüş B1 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



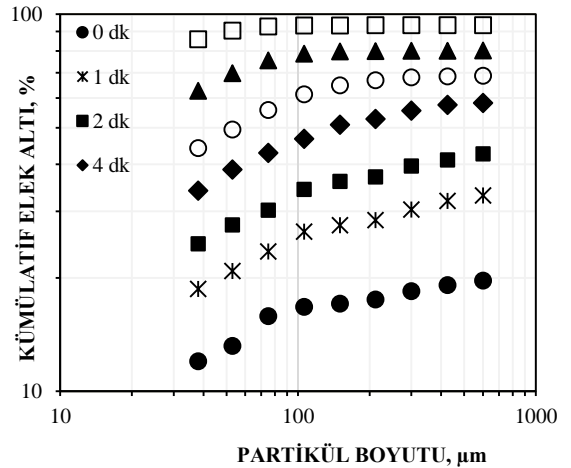
Şekil 2. Çubuklu değirmende öğütülmüş B1 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



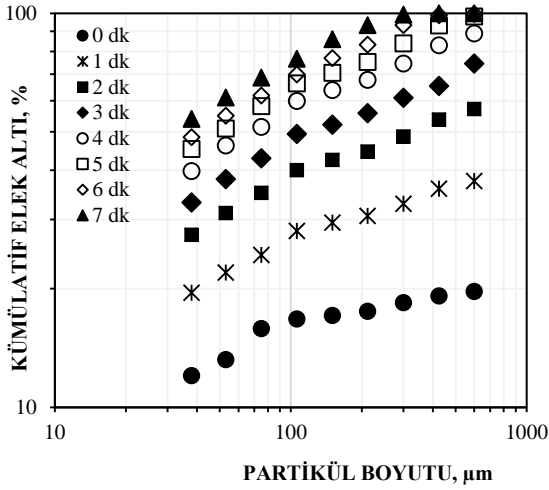
Şekil 3. Bilyalı değirmende öğütülmüş B2 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 4. Çubuklu değirmende öğütülmüş B2 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 5. Bilyalı değirmende öğütülmüş B3 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 6. Çubuklu değirmende öğütülmüş B3 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları

### 3.4 B4 numunesinin öğütme testleri

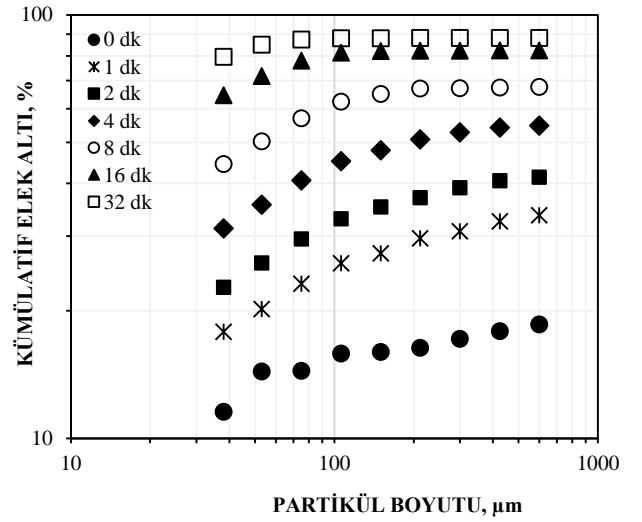
B4 cevheri, çalışılan tüm numunelere kıyasla SiO<sub>2</sub> içeriği (% 36.81) en yüksek olanıdır. Bilyalı ve çubuklu değirmende yapılan öğütme deneylerinden elde edilen partikül boyut dağılımları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir.

B4 numunesinde ise, bilyalı değirmende 16 dakika öğütme ile malzemenin %82.19 ‘u, çubuklu değirmende ise 6 dakika öğütme ile malzemenin %80.66’sı 212 µm’nin altına geçmiştir. Bu süreler B3 numunesiyle aynı olmasına karşın, B3 numunelerine kıyasla elde edilen % elek altı (ince partiküller) miktarları daha düşüktür. Yapılan bilyalı ve çubuklu değirmen ile öğütme testlerinin tümüne bakıldığında, aynı sürelerde, ince partikül eldesi, B4 numunelerinde, diğer tüm numunelere kıyasla daha azdır.

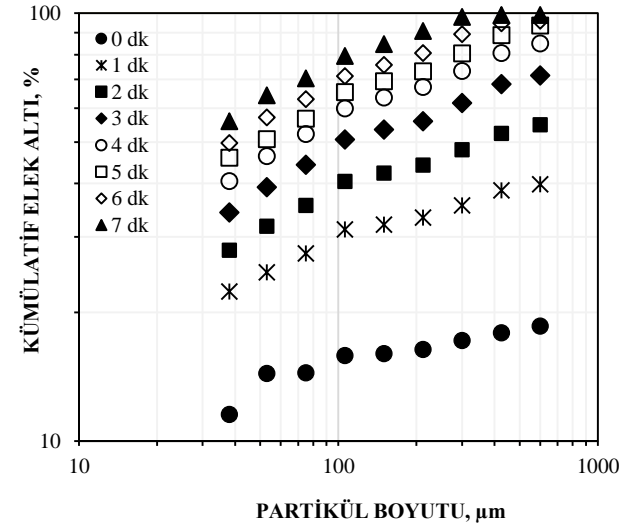
Bilyalı değirmende öğütme süresinin çubuklu değirmene göre uzun olmasının nedenleri öğütme mekanizmalarına bağlı olarak açıklanabilir. Çubuklar arasındaki boşlukların bilyalar arasındaki boşluklardan daha az olması, öğütme süresini kısaltmakta olup birim enerji sarfiyatını da azaltmaktadır. Değirmen ortam ve koşullarıyla beraber, öğütülen malzemenin de kırılma özellikleri etkin olmaktadır. Bu parametreler doğrultusunda cevherin kısa sürede ya da daha uzun sürede öğütülebilirliğini, birinci derece kırılma kinetiğine uyup uymadığını tayin etmektedir.

B1 ve B2 numunelerinde gang yapıcı mineral içeriğinin daha az barit tenörünün (BaSO<sub>4</sub>) daha yüksek olmasına ilaveten baritin de kırılma yapısında olması nedeniyle istenen partikül boyut dağılımına ulaşmak için asgari öğütme süreleri, gang yapıcı mineral içeriği yüksek olan diğer numunelere göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

1.3 mm’nin üzerindeki besleme boyutları için, özgül kırılma oranı kuvars için, çubuklu değirmende bilyalı değirmenden daha yüksek, ancak bu boyutun altında özgül kırılma oranı daha düşük olduğu bildirilmiştir [24]. -38µm boyutlu farklı kompozisyonlardaki barit numuneleri için kıyaslama yapıldığında bu durum yapılan deneysel çalışmalarla da görülmüştür



Şekil 7. Bilyalı değirmende öğütülmüş B4 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları



Şekil 8. Bilyalı değirmende öğütülmüş B4 numunesinin öğütme sürelerine bağlı olarak partikül boyut dağılımları

### 3.5 Yavaşlama etkisinin incelenmesi

Belirlenen ortam ve koşullarda öğütme süresi ilerledikçe birinci derece öğütme olması gerekirken artık lineer ya da orantılı olarak artışın (grafiksel olarak görülebildiği gibi) olmadığı öğütme süresine varıldığında bu öğütme süresi, değirmende yavaşlama etkisinin (slowing down effect) başladığı durum olarak değerlendirilmektedir.

İnce taneler (-38 µm) arttıkça, yavaşlama etkisine değirmenlerde daha çabuk ulaşılmaktadır ve bu olayın öğütülen malzeme, değirmen ortamı ve koşullarına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir.

Her iki değirmen tipindeki yavaşlama etkisini inceleyebilmek için farklı sürelerde yapılan öğütme işlemleri sonrası elde edilen 38µm altına geçen boyut miktarlarının öğütme süresine bağlı değişimi esas alınmıştır.

Tablo 3’te bilyalı değirmende öğütülen farklı barit cevherlerinin, öğütme sürelerine karşın elde edilen -38 µm

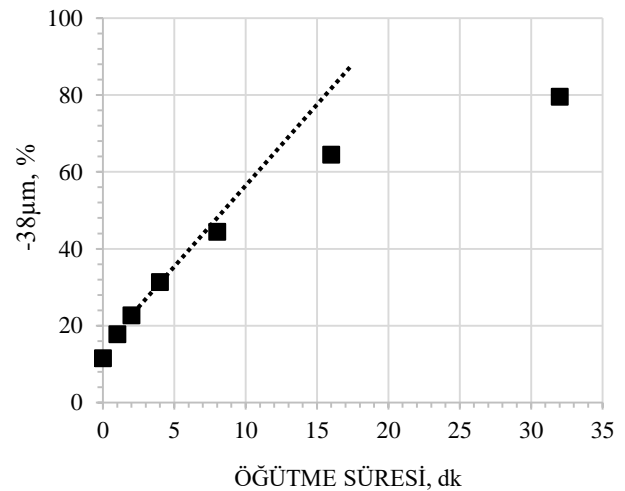
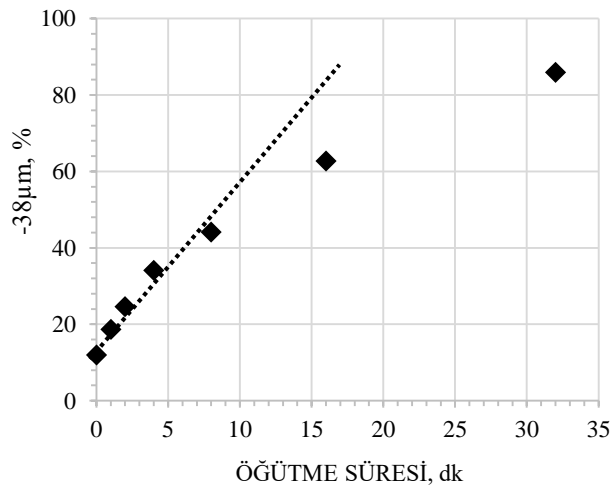
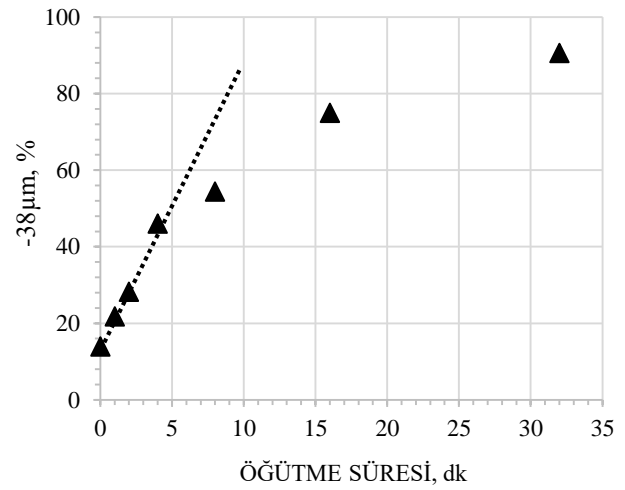
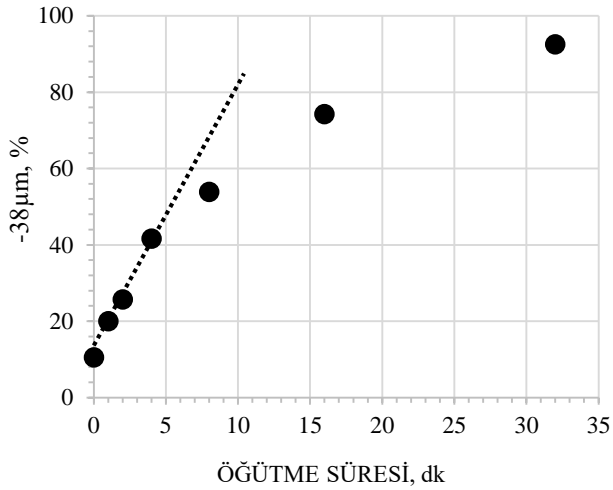
partikül boyutundaki miktarları verilmiştir. Yavaşlama etkisinin belirlenebilmesi için bilyalı değirmende öğütülmüş tüm barit cevherlerinin 38 µm altına geçen boyutlarına karşın öğütme süreleri grafiksel olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9'da da görüldüğü gibi, bilyalı değirmende B1 ve B2 cevherleri için yavaşlama etkisi 4 dakika sonra başlarken B3 ve B4 cevherleri için bu süre 8 dakika olarak

belirlenmiştir. Tablo 4'te ise çubuklu değirmende öğütülen farklı barit cevherlerinin, öğütme sürelerine karşın elde edilen -38 µm partikül boyutundaki miktarları ve Şekil 10'da yavaşlama etkisinin belirlenebilmesi için çubuklu değirmende öğütülmüş tüm barit cevherlerinin 38 µm altına geçen boyutlarına karşın öğütme süreleri grafiksel olarak verilmiştir.

**Tablo 3.** Farklı kompozisyonlardaki barit cevherlerinin bilyalı değirmende öğütülmesi sonucu 38 µm altı partikül boyutuna geçen ürün miktarları

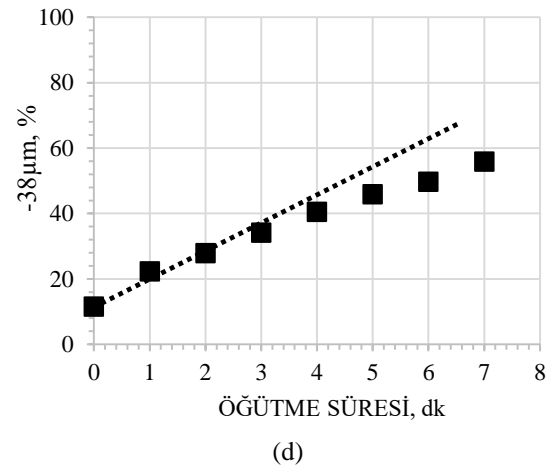
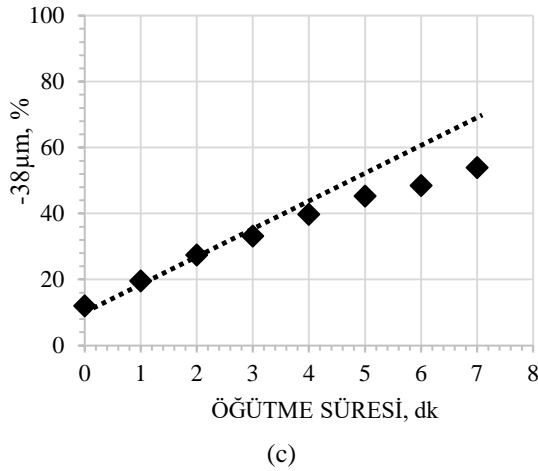
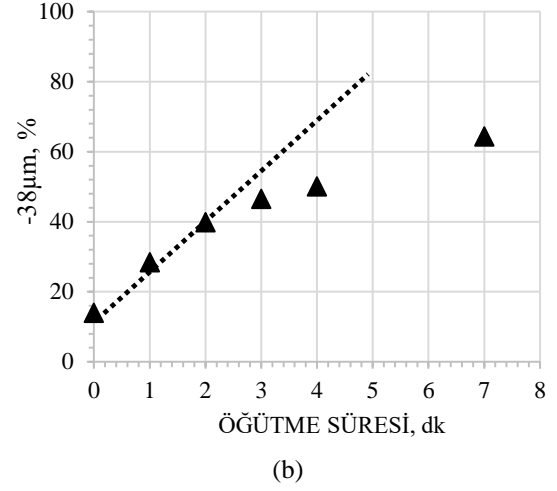
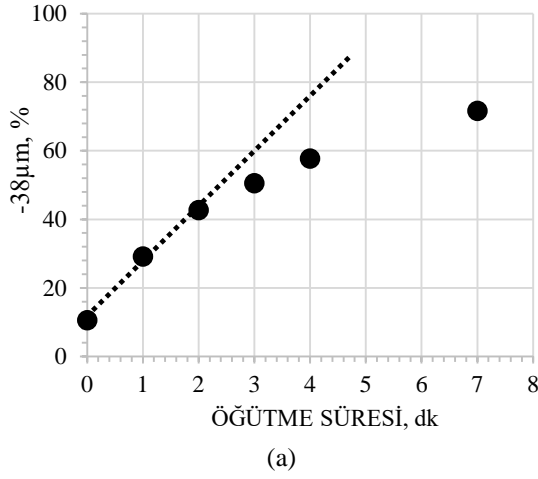
NUMUNE ADI	ÖĞÜTME SÜRESİ, dk						
	0	1	2	4	8	16	32
	38 µm Elek Altı (%)						
B1	10.53	20.01	25.68	41.64	53.85	74.25	92.56
B2	13.98	21.81	28.21	46.02	54.42	74.99	90.63
B3	12.03	18.72	24.66	34.08	44.19	62.73	86.00
B4	11.54	17.83	22.74	31.32	44.43	64.54	79.58



**Şekil 9.** Bilyalı değirmende öğütülmüş numunelerinin yavaşlama etkisini belirlemek için 38 µm boyutunun altına geçen miktarlara karşılık öğütme süreleri ilişkisi (a) B1, (b) B2, (c) B3 ve (d) B4 numunesi

**Tablo 4.** Farklı kompozisyonlardaki barit cevherlerinin çubuklu değirmende öğütülmesi sonucu 38 µm altı partikül boyutuna geçen ürün miktarları

NUMUNE ADI	ÖĞÜTME SÜRESİ, dk							
	0	1	2	3	4	5	6	7
	38 µm Elek Altı (%)							
B1	10.53	29.13	42.65	50.49	57.67	-	-	71.66
B2	13.98	28.42	39.88	46.52	50.12	-	-	64.40
B3	12.03	19.53	27.40	33.11	39.79	45.26	48.46	53.90
B4	11.54	22.36	27.90	34.22	40.51	45.89	49.73	55.89



**Şekil 10.** Bilyalı değirmende öğütülmüş numunelerinin yavaşlama etkisini belirlemek için 38 µm boyutunun altına geçen miktarlara karşılık öğütme süreleri ilişkisi (a) B1, (b) B2, (c) B3 ve (d) B4 numunesi

Çubuklu değirmende tenörü yüksek olan (baritçe zengin) B1 ve B2 numunelerinde yavaşlama etkisi 2 dakikadan sonra başlarken, düşük tenörlü B3 ve B4 numunelerinde 4 dakika sonra başlamıştır. Bu durum Şekil 10'da da görülmektedir.

Çubuklu değirmende, öğütücü ortamdaki, ince partikül miktarının 3 dakika gibi kısa bir sürede elde edilmesinden dolayı, yavaşlama etkisinin bilyalı değirmene göre, daha erken sürelerde karşılaştığı belirlenmiştir. Başka bir ifade ile, bilyalı değirmendeki yavaşlama etkisinin daha yüksek olmasının nedeni, istenilen partikül boyutu için, ürettiği ince partiküller, çubuklu değirmene göre daha uzun sürede elde edilmiştir.

B1 numunesinin kuvars (SiO<sub>2</sub>) içeriği % 0.021, B2 numunesinin % 5.12 iken B3 numunesinin % 34.91 ve B4 numunesinin ise % 36.81'dir. Belirlenen yavaşlama etkileri incelendiğinde kuvars içeriğinin artmasıyla yavaşlama sürelerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

#### 4 Sonuçlar

Kimyasal içerikler, tenör farklılıkları ve safsızlıklar dikkate alındığında benzer özellik gösteren numunelerin kırılma özelliklerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Dolayısıyla yüksek tenörlü B1 ve B2 numunesi, bilyalı değirmende 8 dakika, çubuklu değirmende 3 dakika öğütüldüğünde -212 µm partikül boyutu elde edilmiştir.

Buna karşın, B3 ve B4 numuneleri bilyalı değirmende 16 dakika, çubuklu değirmen 6 dakika öğütüldüğünde istenilen partikül boyutu elde edilebilmiştir. B3 ve B4 numunelerinin -212 µm partikül boyutuna erişmek için öğütme sürelerindeki gözle görülen artışın cevherin kuvars (SiO<sub>2</sub>) içeriğinden kaynaklı olduğu görülmektedir. Barit mineralinin öğütülmesinde kullanılan bilyalı ve çubuklu değirmen karşılaştırıldığında, hem öğütme süresi, hem enerji verimliliği açısından çubuklu değirmenin daha verimli olduğu görülmüştür.

Bilyalı değirmende yavaşlama etkisine yüksek tenörlü B1 ve B2 numunesi için 4 dakika, düşük tenörlü B3 ve B4 numunesi için 8 dakika sonra girerken, çubuklu değirmende, B1 ve B2 numuneleri için yavaşlama etkisi 2 dakika, B3 ve B4 numuneleri için 4 dakika sonra girilmiştir. Sonuç olarak, gang olarak barit cevherinde bulunan kuvars mineralinin öğütme süresi ve yavaşlama etkisinde önemli rol oynadığı görülmektedir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate):** %12

#### Kaynaklar

- [1] P. A. Ciullo, Industrial Minerals and Their Uses: A Handbook and Formulary. In: P. A. Ciullo, The Industrial Minerals – Barite, by Noyes Publication, New Jersey, ABD, 21-23, 1996.
- [2] L. Qi, J. Ma, H. Cheng and Z. Zhao, Preparation of BaSO<sub>4</sub> nanoparticles in non-ionic w/o microemulsions. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 108(1), 117–126, 1996. [https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03317-3](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03317-3).
- [3] D. Katircioğlu Bayel, Ö. Y. Toraman ve Ş. G. Özkan, Baritin yaş öğütülmesinde öğütme parametrelerinin etkisi. Yer Altı Kaynakları Dergisi 14, 31–43, 2018.
- [4] J. R. Kyle, The Barite Industry and Resources of Texas. Bureau of Economic Geology, University of Texas at Austin, 85, 1994.
- [5] E. Sibbing, Barytes, Raw Material for Fillers and Chemicals, in Fleming, R. F. S., Ed., Proceedings, First Industrial Minerals International Congress: London, Metal Bulletin Ltd., 150-158, 1975.
- [6] D. A. Brobst, Barium Minerals, In D.D. Carr, Editor, Industrial Minerals and Rocks, 6th edition, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 125-134, 1994.
- [7] J. Massone, Technology and uses of barium and strontium compounds: Industrial Minerals, No. 177, 65-69, 1982.
- [8] J. Griffiths, Barytes: Non-drilling applications: Industrial Minerals, no. 201, 21-33, 1984.
- [9] Özel İhtisas Komisyonu Raporu (ÖİKR), Kalkınma Bakanlığı, Madencilik Politikaları, On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), Yayın No: Kb: 3041 - Öik: 822, Ankara, 2018.
- [10] C. Aldrich, Consumption of steel grinding media in mills – A Review. Miner. Eng. 49, 77–91, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>.
- [11] J. Jeswiet and A. Szekeres, Energy consumption in mining comminution. Procedia CIRP 48, 140–145, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.250>.
- [12] V. Deniz, Y. Akkurt and Y. Umucu, A new model on breakage behaviour of a laboratory impact mill. The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey, pp. 229–232, Turkey, Izmir, 2005.
- [13] L. G. Austin and O. Trass, Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment, in: M.E. Fayed, L. Otten (Eds.), Handbook of Powder Science and Technology, Van Nostrand Reinhold, The Netherlands. pp. 586–634, 1984. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6373-0_12)
- [14] K. S. Liddell, Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, Proceeding of the International Conference on Gold, Extractive Metallurgy of Gold, 2, pp. 405- 417, 1986.
- [15] H. Hacifazlıoğlu, İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi 01, 17–30, 2009.
- [16] M. Yekeler, Bilyalı değirmenle kuvarsin yaş öğütülme kinetiği, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, pp. 179-184, 1995.
- [17] L. G. Austin and P. Bagga, An analysis of fine dry grinding in ball mills. Powder Technology, 28(1), 83-90, 1981. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(81\)87014-3](https://doi.org/10.1016/0032-5910(81)87014-3).
- [18] E. Teke, M. Yekeler, U. Ulusoy and M. Canbazoglu, Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite. International Journal of Mineral Processing, 67(1–4), 29–42, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00006-6](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00006-6).
- [19] A. Ozkan, M. Yekeler and S. Aydoğan, Breakage parameters of some minerals and coals ground in a laboratory size ceramic mill. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 10(4), 269–276, 2003.
- [20] M. J. Metzger and B. J. Glasser, Simulation of the breakage of bonded agglomerates in a ball mill. Powder Technology, 237, 286–302, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.006>.
- [21] R. P. King, Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems, first ed. Butterworth-Heinemann., 160, 2001.
- [22] V. Deniz, The effects of ball filling and ball diameter on kinetic breakage parameters of barite powder. Advanced Powder Technology, 23(5), 640–646, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2011.07.006>
- [23] M. Yekeler, A. Özkan ve E. Teke, Barit mineralinin ince öğütülmesinin kinetiği. 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 154-159, İzmir, Türkiye, 1997.
- [24] K. B. Quast and P. G. Hicks, Laboratory Studies in Comminution: Part VI; The specific rate of breakage for rod and ball milling of quartz (1), 1–7, 1998.

