



Orijinal Araştırma / Original Research

FARKLI KIRILMA TEST PROTOKOLLERİNİN KAMARALI BİLYALI DEĞİRMEN MODELLEMESİNDE KULLANIMI

THE USE OF DIFFERENT BREAKAGE TEST PROTOCOLS IN MULTI-COMPARTMENT BALL MILL MODELLING

Deniz Altun^{a,*}, Okay Altun^{a,**}

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

Geliş Tarihi / Received : 6 Mayıs / May 2019

Kabul Tarihi / Accepted : 9 Temmuz / July 2019

ÖZ

Anahtar Sözcükler:

Öğütme,
Kırılma,
Modelleme,
Hardgrove,
Ağırlık düşürme

Öğütme devrelerinin modellenmesi, devre tasarımı ve optimizasyonu açısından önem taşımaktadır. Doğru ve güvenilir modeller için malzemenin kırılma dağılımı fonksiyonunun tayin edilmesi önem arz etmektedir. Çalışmada, her bir kamara için ayrı kırılma testlerinin kullanıldığı model yapısı üzerine odaklanılmıştır. Çalışma kapsamında, 2 kamaralı bilyalı değirmen içeren çimento öğütme devresi etrafında ve değirmen içinde örnekleme çalışmaları yürütülmüş ve alınan numunelerin tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Sonrasında madde denkliği çalışmaları yürütülmüştür. Değirmenin ilk kamarası için tek tane ağırlık düşürme testleri, ikinci kamarası için ise Hardgrove kırma testleri yürütülmüş ve tane boyuna bağlı kırılma dağılım fonksiyonları hesaplanmıştır. Çalışma Hardgrove tekniğinin bilyalı değirmen modelindeki ilk uygulamasıdır. Kamaralar ayrı olarak mükemmel karışım modeli kullanılarak modellenmiştir. Simülasyon sonuçları ürün tahminlerinin 1. kamarada tutarlı olduğu ve 2. kamarada ise Hardgrove testinin tek tane testine göre daha olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir.

ABSTRACT

Keywords:

Grinding,
Breakage,
Modelling,
Hardgrove,
Drop weight.

Modelling of grinding circuits is crucial for circuit design and optimization. Determination of breakage distribution function of the materials is important for accurate and reliable modelling. In this study, the model structure was focused on using separate breakage tests for each chamber. Within the study, sampling studies were performed around the grinding circuit containing 2-chamber ball mill and inside the mill and, particle size distributions of collected samples were determined. Then mass balance studies were performed. Single particle drop weight test for the chamber-1 while Hardgrove test for the second chamber of the mill was carried out then size-dependent breakage distribution functions were calculated. The study is the first application of using Hardgrove technique in the ball mill model. Each chamber was modelled separately by using Perfect Mixing Model. Simulation results showed that the product estimations were accurate for the chamber-1 that the Hardgrove test was suitable for the chamber-2.

* Sorumlu yazar / Corresponding author: deksi@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0003-1464-8337>

** okyalgun@hacettepe.edu.tr * <https://orcid.org/0000-0002-9823-3130>

GİRİŞ

Çimento üretimi enerji yoğun bir işlem olup, bu işlemde tüketilen enerjinin dünya endüstriyel enerji tüketiminin yaklaşık olarak %8,5-12'sini oluşturduğu belirtilmektedir (Madloul vd., 2011; Huang vd., 2016). Kırma, öğütme, pişirme gibi birçok alt operasyondan oluşan bu proseste enerji kullanımının en büyük kaynağı, %30'luk bir pay ile öğütme işlemidir. Yüksek enerji tüketimi, üretici ve araştırmacılar tarafından yoğun olarak ele alınmış ve enerji tasarruflu ekipmanlar ile mevcut öğütme devrelerinin iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Verimli ekipmanların geliştirilmesinin yanı sıra modelleme ve simülasyon araçları da devre iyileştirme sürecinde yer alabilmektedirler. Simülasyon araçlarının güvenilirliği ise ekipman model yapılarının sağlıklı bir şekilde geliştirilmesine bağlı olmaktadır. Literatürde öğütme devrelerinin modellenmesi ve simülasyonu üzerine birçok çalışma yer almaktadır (Austin vd., 1975; Austin vd., 1984; Benzer vd., 2001; Jankovic vd., 2004; Dundar vd., 2011; Genc, 2015; Altun, 2016).

Öğütme devrelerinin matematiksel modellenmesinde malzemelerin kırılma karakteristikleri büyük önem taşımakta ve modelde kırılma dağılım fonksiyonu adı altında yer almaktadır. Kırılma dağılım fonksiyonu malzemenin tane boyuna bağlı olarak normalize edilmekle birlikte, tane boyundan bağımsız olarak da ifade edilebilmektedir. Tane boyundan bağımsız olarak hesaplanan kırılma dağılımı fonksiyonunda, kırılma karakteristiği her tane boyu için aynı kabul edilmektedir (Epstein, 1948; Broadbent ve Callcott, 1956; Gardner ve Austin, 1962; Kelsall ve Reid, 1965; Herbst ve Fuerstenaun, 1968; Stewart ve Restarick, 1971; Schönert, 1972; Whiten, 1976; Lynch, 1977; Krogh, 1978; Austin vd., 1982). Ancak, tane boyuna bağlı olarak malzemelerin kırılma dağılımının değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle de tane boyunun malzeme kırılma karakteristiği üzerine etkilerinin incelendiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Yashima vd., 1987; Pauw ve Mare, 1988; Gao ve Forssberg, 1990; Krajinovic, 1996; Fandrich vd., 1998; Tavares ve King, 1998). Banini (2000), Vogel ve Peukert (2003, 2004), Shi ve Kojovic (2007), Eksi vd. (2011) gibi araştırmacılar tane boyunun kırılma dağılım fonksiyonu üzerinde olan etkisini modellemişlerdir.

Kırılma dağılımının ölçülmesinde kullanılmak üzere birçok yöntem geliştirilmiştir. Ağırlık düşürme test aleti ile yürütülen tek tane kırma testleri yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Tek tane testinin etkili olarak kullanılabileceği tane boyu yaklaşık 4 mm olup, ince tane boyları için uygulanabilirliği düşük olmaktadır. İnce tane boylarında tek tane testlerinin yerini yatak kırma ya da Hardgrove kırma testleri alabilmektedir. Eksi vd. (2011), klinker ve kireçtaşı için darbe ile yatak kırma testleri yürütmüş ve 38 µm'ye kadar malzemeleri karakterize etmiştir. Barrios vd. (2011) ise yük hücresi kullanarak ince tanelerin darbe altında kırılma davranımlarını incelemiştir. Xie vd. (2015) 500 µm inceliğine kadar olan kömür numunelerinin kırılma karakterizasyonu Hardgrove test aleti ile belirlemiştir. Dolayısıyla, tane boyuna bağlı olarak kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi de farklı teknikler ile mümkün olabilmektedir. Çimento değirmenleri incelendiğinde, birden fazla öğütme kamarasının olduğu ve bu kamaralara giriş yapan malzeme tane boylarının da farklı olduğu görülmektedir. Bu nedenle de çok kamaralı bilyalı değirmenlere ait model yapısı geliştirilirken bu farklılığın göz önünde bulundurulması ve her iki kamara için de malzeme kırılma davranımının farklı teknikler ile belirlenmesinin daha güvenilir sonuçlar vereceği öngörülmektedir.

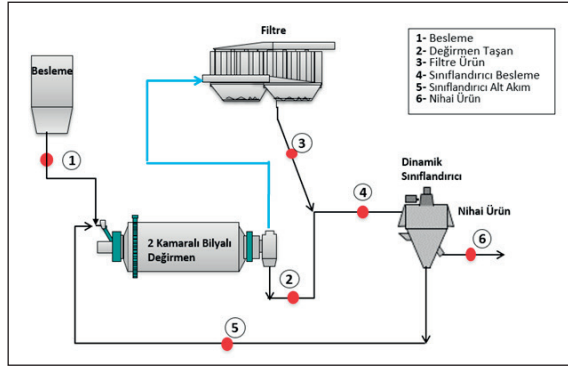
Yürütülen bu çalışmada, kapalı devre olarak işletilen 2 kamaralı bilyalı değirmen devresi için devre etrafı ve değirmen içi örnekleme, malzeme karakterizasyonu, madde denkliliği ve modelleme-simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Daha iri besleme tane boyuna sahip 1. kamara için tek tane ağırlık düşürme testi, ince öğütmenin gerçekleştiği 2. kamara için ise tek tane ağırlık düşürme testi ve Hardgrove kırma testleri uygulanmıştır. Simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen farklılıklar tartışılmıştır.

1. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

1.1. Tesis Örnekleme Çalışmaları

Örnekleme çalışmaları Ankara'da bulunan bir çimento fabrikasının öğütme devresinde yürütülmüştür. Çimento öğütme devresine ait basitleştirilmiş devre şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.

Devrede, iki kamaralı bilyalı değirmen, değirmen çıkışında filtre ve son ürün boyunun elde edilmesini sağlayan dinamik havalı sınıflandırıcı bulunmaktadır. Ekipmanlara ait teknik özellikler Çizelge 1'de sunulmaktadır.



Şekil 1. Devre akım şeması ve örnekleme noktaları

Çizelge 1. Öğütme devresi ekipmanlarının teknik özellikleri

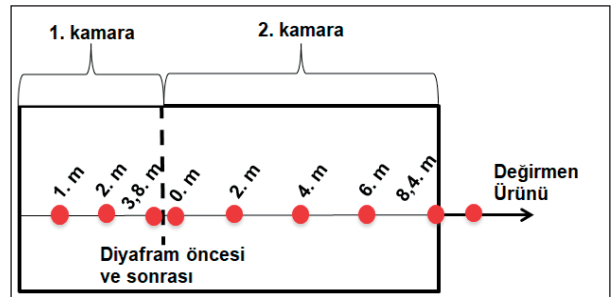
| | |
|------------------------------------|---------|
| Bilyalı Değirmen | |
| Çap (m) | 4 |
| 1. kamara boyu (m) | 3,9 |
| 2. kamara boyu (m) | 8,4 |
| 1. kamara maks. bilya boyu (mm) | 80 |
| 2. kamara maks. bilya boyu (mm) | 50 |
| 1. kamara bilya doluluk oranı (%) | 23 |
| 2. kamara bilya doluluk oranı (%) | 28 |
| Dönüş hızı (rpm) | 16 |
| Kritik hız (%) | 76 |
| Kurulu güç (kW) | 3700 |
| Dinamik Sınıflandırıcı | |
| Rotor çapı (m) | 2,53 |
| Fan kapasitesi (m ³ /s) | 181,440 |
| Değirmen Filtresi | |
| Fan kapasitesi (m ³ /s) | 81,430 |

Örnekleme çalışmaları öncesinde devrenin çalışma koşulları incelenmiş ve kararlı durumda olup olmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda belirlenen bir çalışma koşulu sırasında devre şartları 3 saat boyunca incelenmiş ve salınımın en az olarak gözlemlendiği 1 saatlik süreç sonunda örnekler toplanmaya başlamıştır. Denge

durumunda kaydedilen kontrol odası değerleri Çizelge 2'de özetlenmektedir. Örnekleme çalışmaları öncelikli olarak devre etrafı numuneleri için başlamış, sonrasında ani duruş ile besleme kantarları ve değirmen içi kamaraları örneklenmiştir. Değirmen içi örneklemede eksen boyunca aralıklı olarak numuneler alınmıştır. Alınan numune miktarları, örnekleme noktasındaki akış hızı ve tane boyu dağılımı göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Değirmen içi örnekleme noktaları Şekil 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. Örnekleme sırasında kaydedilen devre çalışma koşulları

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Akış Hızı (t/s) | |
| Klinker | 93 |
| Kireçtaşı | 5,2 |
| Alçı | 5,2 |
| Sınıflandırıcı Geri Dönüş | 294,7 |
| Güç (Kw) | |
| Değirmen | 3303 |
| Değirmen Elevatör | 89,4 |
| Sınıflandırıcı | 146,3 |
| Toplam | 3538,7 |
| Sınıflandırıcı Rotor Hızı (dev/dk.) | 154 |
| Sınıflandırıcı Hava Hızı (%) | 100 |
| Öğütme Kimyasal Dozajı (kg/t) | 0,5 |



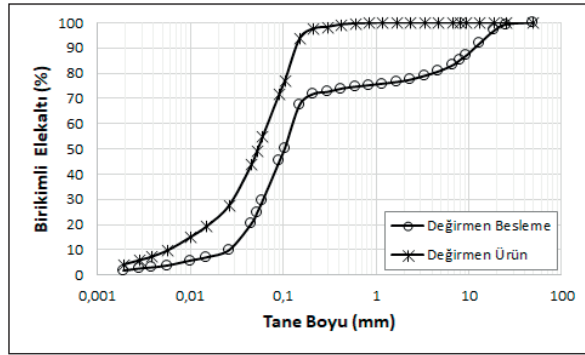
Şekil 2. Değirmen içi numune alma noktaları

Örnekleme çalışmalarının ardından, alınan numunelerin boyut dağılımları en üst boydan 150 µm'ye kadar $\sqrt{2}$ serisi kullanılarak elek analizi ile 150 µm altı ise Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında yer alan Sympatec marka lazerli ölçüm cihazı kullanılarak kuru ölçüm ile belirlenmiştir.

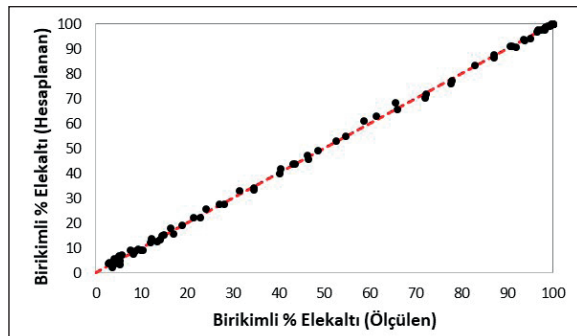
1.2. Madde Denkliği Çalışmaları

Madde denkliği çalışmaları; toplanan verilerin istatistiksel olarak hatalarından arındırılması, buna bağlı olarak da boyut dağılımlarının ve akış hızlarının hesaplanabilmesi için yürütülen hesaplamaları kapsamaktadır. Örnek alma çalışmaları sırasında; sistemin doğal dinamik yapısı, fiziksel koşullar, ölçüm ve insan kaynaklı hatalar ortaya çıkmaktadır. Madde denkliği, bu hataları dikkate alarak istatistiksel olarak ham verilerin düzeltilip tane boyu ve akış hızlarının en iyi tahmininin hesaplanmasını sağlamaktadır.

Bu çalışmada, bilyalı değirmenin her kamarasının ayrı olarak modellenmesi için değirmen giriş ve değirmen çıkış akışlarının tonaj ve tane boyu dağılımı verileri madde denkliği sonucu elde edilmiştir. Madde denkliği sonucu hesaplanan değirmen giriş ve çıkış tane boyu dağılımları ile madde denkliğinin tutarlılığını gösteren ölçülen-hesaplanan veri grafiği sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir. Değirmen girişine ait boyut dağılımı, o noktadan numune alınamamasından kaynaklı, madde denkliği sonucunda hesaplanmıştır. Bu nedenle de Şekil 4'te gösterilen veriler değirmen çıkışına ait ölçülen ve hesaplanan birikimli elek altı yüzde değerlerini özetlemektedir.



Şekil 3. Hesaplanan değirmen besleme ve ürün tane boyu dağılımları



Şekil 4. Değirmen çıkışı ölçülen-hesaplanan birikimli elek altı değerleri

Ölçülen ve hesaplanan değerlerin yakın olması örnekleme çalışmalarının minimum hata ile gerçekleştirildiğini göstermektedir.

1.3. Malzeme Karakterizasyonu

Bir öğütme ekipmanının modellenmesinde malzeme etkisini yansıtan kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, bilyalı değirmenin 1. kamara ve 2. kamarasının modellenmesinde kullanılmak üzere iki farklı kırılma dağılım fonksiyonunun hesaplanması hedeflenmiştir. Değirmenin 1. kamarası için ağırlık düşürme test aleti kullanılırken, daha ince boyda malzemenin geldiği değirmen 2. kamarası için Hardgrove test aleti kullanılarak kırılma dağılımları belirlenmiştir.

1.3.1. Tek Tane Ağırlık Düşürme Testi

Tek tane kırma testleri Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği laboratuvarında yer alan ağırlık düşürme test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Düzenek basit bir mekanizmaya sahip olup, malzemenin yerleştirildiği örs, çeşitli ağırlıklar ve bu ağırlıkların tutulduğu manyetik bir kafa ile mekanik bir koldan oluşmaktadır (Foto 1).

Test öncelikli olarak tanelerin örsün merkezine yerleştirilmesiyle başlamaktadır. Sonrasında tanelerin kırılacağı enerji seviyesine bağlı olarak manyetik kafaya yerleştirilen demir ağırlıklar belirli bir yüksekliğe çıkarılmakta ve serbest düşürülmektedir. Enerji hesabı yapılırken potansiyel enerji denkleminde faydalanılmakta olup, istenilen özgül enerji değerine bağlı olarak yükseklik geri hesaplanabilmektedir.

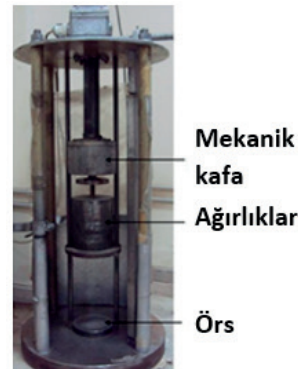


Foto 1. Ağırlık düşürme test düzeneği

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de sırasıyla potansiyel enerji ve özgül enerji denklemleri ve değişkenlerin anlamları verilmektedir.

$$E_i = m_d g (h_i - h_f) \quad (1)$$

Eşitlikte;

- E_i : Darbe kırma enerjisi ($m^2 \text{ kg/s}^2$)
 m_d : Düşürülen ağırlık (kg)
 h_i : Düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki ilk yüksekliği (m)
 h_f : Düşürülen ağırlığın örsün üzerindeki son yüksekliği (m)

$$E_{CS} = E_i / m_p \quad (2)$$

Eşitlikte;

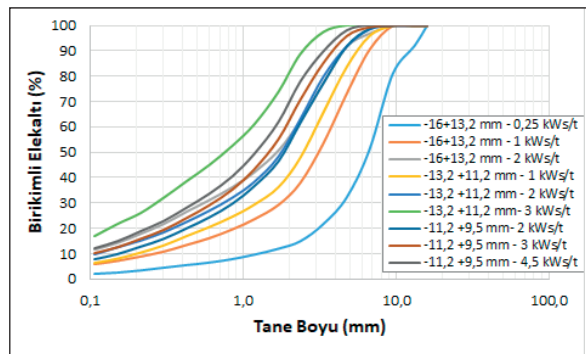
- E_{CS} : Özgül ufalama enerjisi, kWs/t
 m_p : Ortalama tane ağırlığı, g

Çalışmada klinker numunesi kullanılmıştır. Bu numuneden dar tane fraksiyonları halinde taneler elenmiş ve sonrasında farklı enerji seviyelerinden kırılmışlardır. Tek tane kırma test koşulları Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 3. Tek tane kırma test koşulları

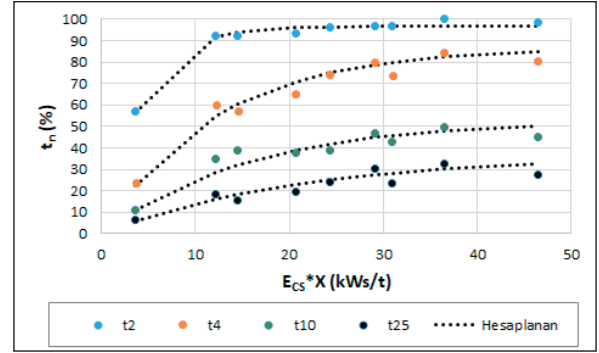
| Tane Boyu Fraksiyonu (mm) | Özgül Ufalanma Enerjisi, E_{CS} (kWs/t) | 1 | 2 |
|---------------------------|---|---|-----|
| -16 +13,2 | 0,25 | 1 | 2 |
| -13,2 +11,2 | 1 | 2 | 3 |
| -11,2 +9,5 | 2 | 3 | 4,5 |

Test sonrasında kırılan ürünlerin tane boyu dağılımları elek analizi ile belirlenmiştir. Ürün tane boyu dağılımları Şekil 5'de verilmektedir.



Şekil 5. Tek tane kırma testi sonucu elde edilen ürün tane boyu dağılımları

Şekil 5'den anlaşılacağı üzere, boyut aralıklarındaki ve enerji seviyelerindeki farklılıklar kırılma davranımını doğrudan etkilemektedir. Daha yüksek enerji seviyesinden kırılan taneler beklendiği üzere daha ince tane eldesine yol açmaktadır.



Şekil 6. Tek tane kırma testi E_{CS} - t_n ilişkisi

Çalışmanın sonraki aşamasında, enerji, tane boyu ve incelik değerlerinin, Eşitlik 3'te verilen tane boyuna bağımlı kırılma modeline (Ekşi vd., 2011) uyumu incelenmiştir.

$$t_n = A * (1 - e^{(-b * E_{CS} * X)}) \quad (3)$$

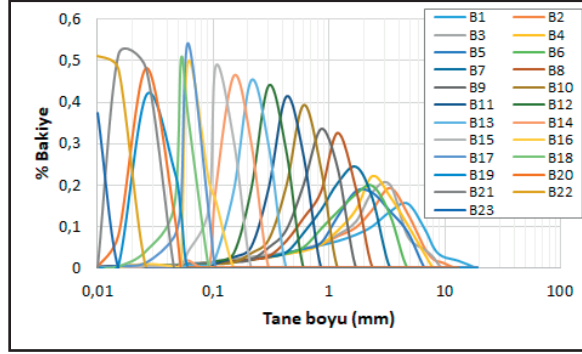
Eşitlikte;

- n : 2, 4, 10 ve 25
 A ve b : Model parametreleri
 X : Ortalama tane boyu

Model parametreleri bir istatistik programı kullanılarak geri hesaplanmış, ölçülen verilerin modele uyumunun yüksek olduğu anlaşılmıştır (Çizelge 4). Yüksek uyum sonucunda, geri hesaplanan model parametreleri her tane boyu fraksiyonu için kırılma dağılımının hesaplanmasında kullanılmıştır. Hesaplama yönteminde değirmen beslemesinde yer alan her bir tane boyu aralığının geometrik ortalaması alınarak ortalama tane boyları belirlenmiştir. Belirlenen her bir ortalama tane boyu için Genç (2002) tarafından önerilen 1 kWs/t enerji seviyesinde Eşitlik 3 kullanılarak t_2 , t_4 , t_{10} ve t_{25} değerleri hesaplanmış ve interpolasyon ve ekstrapolasyon yöntemleri ile kırılma dağılım fonksiyonları oluşturulmuştur. Tane boyuna bağlı olarak hesaplanan kırılma dağılım fonksiyonu Şekil 7'de gösterilmektedir.

Çizelge 4. Tek tane kırma testi-Hesaplanan model parametreleri

| | t_2 | t_4 | t_{10} | t_{25} |
|-------|--------|--------|----------|----------|
| A | 96,660 | 86,670 | 52,912 | 36,997 |
| b | 0,243 | 0,082 | 0,065 | 0,047 |
| R^2 | 0,990 | 0,980 | 0,898 | 0,929 |



Şekil 7. Tek tane testi sonucu hesaplanan tane boyuna bağımlı kırılma dağılım fonksiyonu

1.3.2. Hardgrove Testi

Değirmenin 2. kamarasının modellenmesinde kullanılmak üzere klinkerin kırılma davranımı Hardgrove test ekipmanı (Foto 2) kullanılarak incelenmiştir.



Foto 2. Hardgrove test ekipmanı

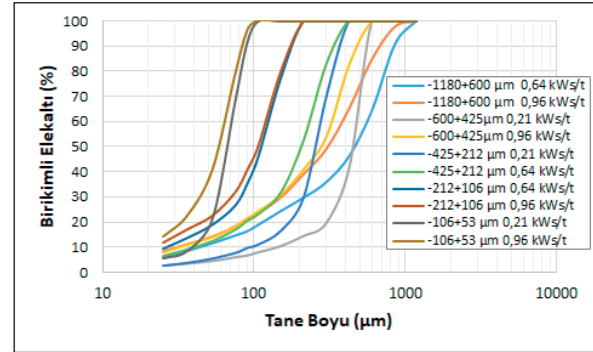
Çalışma kapsamında Hardgrove testinde kullanılmak üzere, değirmen 2. kamara boyut dağılımı göz önünde bulundurularak, klinker numunesi ince dar tane boyu fraksiyonlarına

ayrılmıştır. Sonrasında her bir test için 50 gr malzemeyeleştirilmiş, düşük, orta veya yüksek olmak üzere farklı dönüş hızlarında öğütülmüşlerdir. Öncelikli olarak, Hardgrove ürün boyut dağılımları farklı dönüş hızları için belirlenmiştir. Sonrasında, ürünlerin %80'inin geçtiği tane boylarındaki değişime bağlı olarak enerji seviyeleri Bond eşitliğine göre hesaplanmıştır (Bond, 1961). Tane boyu fraksiyonları ve hesaplanan enerji seviyeleri Çizelge 5'de verilmektedir.

Çizelge 5. Hardgrove test koşulları

| Tane Boyu Fraksiyonu (μm) | Özgül Ufalanma Enerjisi, E_{CS} (kWs/t) | |
|--|---|------|
| -1180+600 | 0,64 | 0,96 |
| -600+425 | 0,21 | 0,96 |
| -425+212 | 0,21 | 0,64 |
| -212+106 | 0,64 | 0,96 |
| -106+53 | 0,21 | 0,96 |

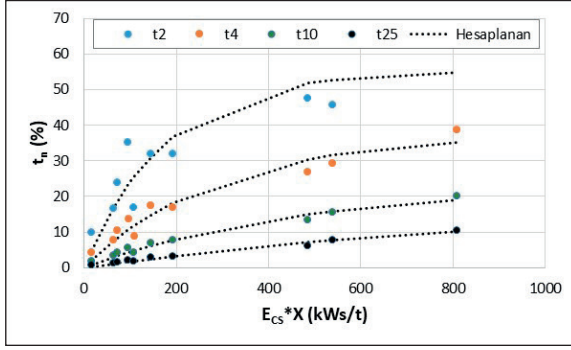
Test sonucunda elde edilen ürünlerin tane boyu dağılımları belirlenmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Hardgrove kırma testi sonucu elde edilen ürün tane boyu dağılımları

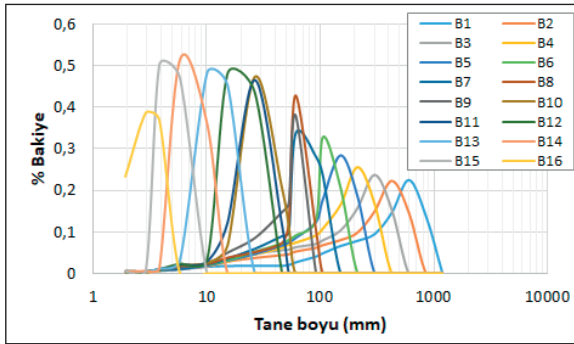
Tek tane testi sonuçlarının değerlendirilmesine benzer olarak, elde edilen tane boyu dağılımları, enerji ve kırılan tane boyu aralığı bilgilerinin kırılma modeline (Eşitlik 3) uyumluluğu incelenmiştir. Bu ilişki Şekil 9'da gösterilmektedir.

Hesaplanan model parametreleri ile modele uyumu Çizelge 6'da verilmektedir. Sonuçlara göre verilerin uygun olduğu anlaşılmış ve kırılma dağılım fonksiyonu her bir tane boyu fraksiyonu için hesaplanmıştır. Hardgrove test sonuçlarına göre hesaplanmış tane boyuna bağımlı kırılma dağılım fonksiyonu Şekil 10'da gösterilmiştir.

Şekil 9. Hardgrove kırma testi $E_{CS}-t_n$ ilişkisi

Çizelge 6. Hardgrove kırma testi-Hesaplanan model parametreleri

| | t_2 | t_4 | t_{10} | t_{25} |
|-------|--------|--------|----------|----------|
| A | 55,224 | 37,270 | 22,892 | 17,402 |
| b | 0,006 | 0,004 | 0,002 | 0,001 |
| R^2 | 0,913 | 0,972 | 0,990 | 0,994 |



Şekil 10. Hardgrove testi sonucu hesaplanan tane boyuna bağımlı kırılma dağılım fonksiyonu

2. MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALAR

Bilyalı değirmenin her iki kamarasının da modellenmesinde Whiten (1974) tarafından önerilen mükemmel karışım modeli kullanılmıştır. Değirmenin mükemmel karışmış tek bir birimden meydana geldiği varsayımında bulunan bu modelin matematiksel ifadesi Eşitlik 4'te verilmektedir.

$$f_i - r_i \frac{r_i}{a_i} + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j \frac{r_j}{a_i} - p_i = 0 \quad (4)$$

Burada;

f_i : Değirmenin içerisindeki i fraksiyonunun kütle akış hızı (t/s)

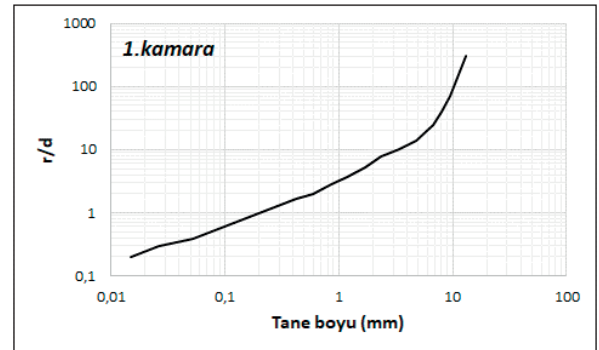
p_i : Değirmen çıkışındaki i fraksiyonunun kütle akış hızı (t/s)

r_i : i fraksiyonunun özgül kırılma hızı

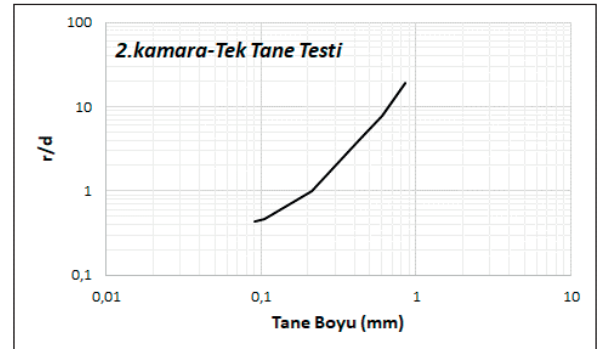
a_{ij} : Kırılmadan sonra i boyunda oluşan j boyunun kütle fraksiyonu (kırılma dağılım fonk.)

d_i : i fraksiyonunun özgül çıkış hızı

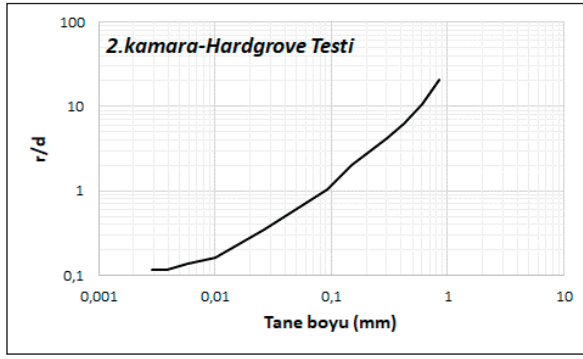
Değirmen 1. kamara modelinde değirmen girişi tane boyu dağılımı besleme (f) olarak, 1.kamara son nokta tane boyu dağılımı ise ürün (p) olarak kullanılmıştır. Tek tane kırma testleri sonucunda hesaplanan kırılma dağılım fonksiyonu (a_{ij}) kullanılmış ve r/d model parametresi her bir tane boyu fraksiyonu için geri hesaplanmıştır. Değirmen 2. kamarasının modellenmesi aşamasında besleme ve ürün boyut dağılımları, sırasıyla 2. kamara son nokta ve değirmen çıkışı olarak alınmıştır. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, değirmen 2. kamarasındaki tahmin farklılığının ortaya konulması amacıyla tek tane testi ve Hardgrove testi sonucu elde edilen kırılma dağılım fonksiyonları kullanılmıştır. Her iki kamara için hesaplanan r/d değerleri Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 11. 1. kamara için hesaplanan r/d parametreleri



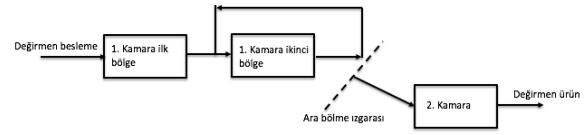
Şekil 12. 2. kamara için hesaplanan r/d parametreleri (Tek tane testi)



Şekil 13. 2. kamara için hesaplanan r/d parametreleri (Hardgrove testi)

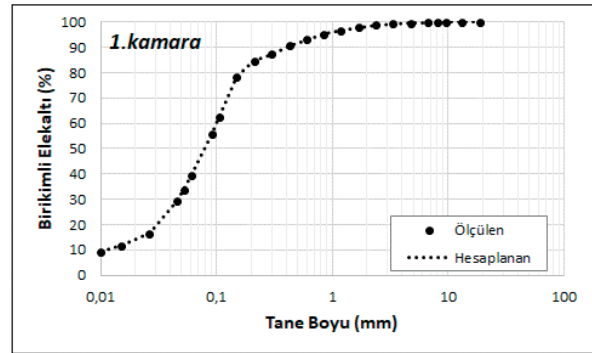
Değirmen ilk kamara için r/d değerleri alt tane boylarına kadar hesaplanabilmiştir. Şekil 12 ve Şekil 13'te değirmen 2. kamarasına ait tek tane ve Hardgrove testlerinden gelen kırılma dağılımlarının kullanılması sonucu hesaplanan r/d grafikleri gösterilmektedir. İki grafik arasındaki temel fark Hardgrove testinden hesaplanan r/d değerlerinin alt boylara inmesi öte yandan tek tane testi ile r/d değerlerinin belirli bir boyuttan altında hesaplanamamasıdır. Çalışmalar sırasında tek tane testlerinde 90 µm boyundan alt boylarda r/d değerlerinin negatif olarak hesaplandığı bulunmuş ve bu nedenle de grafiksel olarak gösterilememiştir. Bu durum, tane boyunun kırılma davranımı üzerine etkisinin tanımlanmamasından kaynaklanmaktadır (Ekşi vd., 2011). Bu çalışmada, 2. kamarada Hardgrove testi ile elde edilen kırılma dağılım fonksiyonunun 2. kamara içindeki kırılmayı temsil ettiği ve tüm boylar için r/d parametresinin hesaplanabildiği kanıtlanmıştır.

Hesaplanan r/d model parametreleri, değirmen simülasyonunda kullanılmıştır. Bu çalışmadaki amaç, hesaplanan kırılma dağılımı fonksiyonlarının model ile olan uyumunu test etmek ve ürün boyut dağılımlarını kıyaslamaktır. Simülasyon çalışmalarında kullanılmış olan yaklaşım Şekil 14'te özetlenmektedir (Benzer vd., 2001). Bu model yapısında ilk kamara ara bölme ızgarası öncesi iki farklı bölgeye ayrılmış, ikinci kamara ise tek bir değirmen olarak ifade edilmiştir. Çalışmanın çıktısı olarak, kamara ürünleri boyut dağılımları tahmin edilmiş ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır.

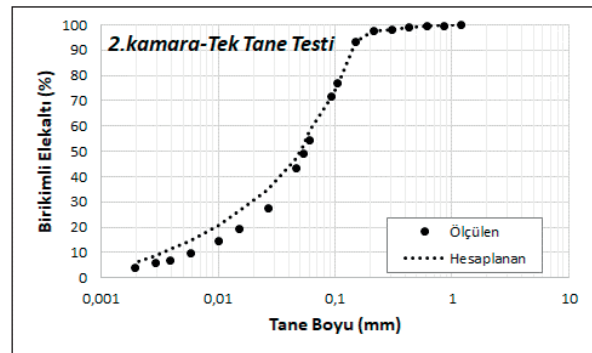


Şekil 14. Kamaralı Bilyalı değirmen model yapısı

Kamaralara ait, simülasyon çalışması neticesinde hesaplanan ürün boyut dağılımları ve ölçülen değerler ile olan karşılaştırmaları Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de gösterilmektedir. Önemle belirtmek gerekir ki, toplamda iki simülasyon çalışması yürütülmüştür. İlk olarak, bütün değirmen modelinde sadece tek tane kırma yöntemi ile elde edilen kırılma dağılım fonksiyonu kullanılmıştır (Şekil 15, Şekil 16). Bir diğer simülasyon çalışmasında ise, ilk kamarada tek tane ikinci kamarada ise Hardgrove değirmeninden hesaplanan kırılma dağılım fonksiyonu test edilmiştir (Şekil 15, Şekil 17).



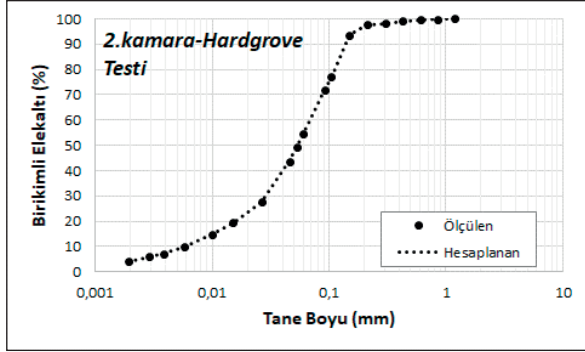
Şekil 15. 1. kamara ürün boyut dağılımı tahmini



Şekil 16. 2. kamara ürün boyut dağılımı tahmini (Tek tane testi)

Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilen boyut dağılımlarından, ilk kamara ürünü tahmininin en

az hata ile gerçekleştiği, 2. kamarada ise ince boyların tahmininde sapmalar olduğu anlaşılmıştır (Şekil 16). Özellikle, 50 µm altı tane boyu dağılımındaki etki incelendiğinde, hesaplanan ürün boyut dağılımının ölçülen değere kıyasla daha ince olduğu tespit edilmiştir. Özetle, tek tane testine tabi tutulan tane boyu fraksiyonlarının iri olması nedeniyle ince tanelerin kırılmasını temsil etmemektedir.



Şekil 17. 2. kamarada ürün boyut dağılımı tahmini (Hardgrove testi)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, kamaralı bilyalı değirmen modellemesinde farklı kamaralar için farklı karakterizasyon tekniklerinin kullanılmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, 2 kamaralı bilyalı değirmen için her bir kamaraya ait model yapısı geliştirilirken farklı kırılma dağılımı fonksiyonu belirleme tekniklerinden faydalanılmış ve değirmen model yapısı iyileştirilmiştir. Ayrıca Hardgrove değirmeninden elde edilen kırılma dağılımı fonksiyonu, kamaralı bilyalı değirmen modellemesinde ilk olarak kullanılmaktadır.

Çalışmada değirmenin ilk kamarası için yaygın olarak uygulanan tek tane kırma testi uygulanmıştır. Değirmenin 2. kamarasında ise, tek tane yönteminin yanı sıra, bu kamaraya gelen tanelerin daha ince olması sebebiyle, ince tanelerin kırılma davranımlarının ölçülebileceği bir test olan Hardgrove testi kullanılmış ve her tane boyu fraksiyonu için kırılma dağılımı fonksiyonu hesaplanmıştır. Toplamda iki simülasyon çalışması yürütülmüş olup, ilk çalışma tek tane yöntemi ile tüm değirmen modellemesi üzerine odaklanılırken,

ikinci çalışmada tek tane ilk kamarada, Hardgrove testi ikinci kamarada kullanılmıştır. Elde edilen bulgular, tek tane yöntemi kullanılarak hesaplanan kırılma dağılımı fonksiyonunun ilk kamarada az hata ile ürün boyunu tahmin ettiğini ancak ikinci kamarada ise sapmaların 50 µm boyundan alt boylarda yüksek olduğunu göstermiştir. Diğer bir simülasyon çalışmasının sonuçları incelendiğinde, Hardgrove testinden elde edilen kırılma dağılımı fonksiyonunun minimum hata ile ikinci kamarada ürün dağılımını tahmin ettiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, Hardgrove değirmeninden elde edilen kırılma dağılımı fonksiyonunun bilyalı değirmen model yapısında kullanılabileceği, her iki kamarada için ayrı kırılma dağılımı fonksiyonu hesaplanmasının model tutarlılığı açısından da daha doğru olumlu sonuçlar vereceği anlaşılmıştır.

Elde edilen bulgular doğrultusunda, çalışmanın farklı öğütme koşullarında tekrarlanması ve bu anlamda geliştirilen karakterizasyon metoduna olan güvenilirliğin artırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Altun, O., 2016. Simulation Aided Flow Sheet Optimization of a Cement Grinding Circuit by Considering the Quality Measurements. Powder Technology, 301, 1242-1251.
- Austin, L. G., Luckie, P. T., Wightman, D., 1975. Steady-state Simulation of a Cement-milling Circuit. Int. J. Miner. Process., 2, 127-150.
- Austin, L. G., Weller K. R., 1982. Simulation and Scale-up of Wet Ball Mills. XIV International Mineral Processing Congress, October 17-23, Toronto, Canada, 8.1-8.24.
- Austin, L. G., Luckie, P. T., Shoji, K., Rogers, R. S. C., Brame, K., 1984. A Simulation Model for an Air-Swept Ball Mill Grinding Coal. Powder Technol., 38, 255-266.
- Banani, G. A., 2000. An Integrated Description of Rock Breakage in Comminution Machines. PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC), Australia.
- Barrios, G. K. P., Carvalho, R. M., Tavares, L. M., 2011. Extending Breakage Characterization to Fine Sizes by Impact on Particle Beds. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 120, 37-44.
- Benzer, A. H., Ergun, S. L., Oner, M., Lynch, A. J., 2001. Simulation of Open Circuit Clinker Grinding. Miner. Eng., 14 (7), 701-710.

- Bond, F. C., 1961. *Crushing and Grinding Calculations*. Allis-Chalmers Industrial Press Department.
- Broadbent, S. R., Callcott, T. G., 1956. A Matrix of Processes Involving Particle Assemblies. *Phil. Trans. R. Soc. Lond., Ser., A*, 249, 99-123.
- Dundar, H., Benzer, H., Aydoğan, N. A., Altun, O., Toprak, N. A., Özcan, O., Eksi, D., Sargin, A., 2011. Simulation Assisted Capacity Improvement of Cement Grinding Circuit: Case Study Cement Plant. *Miner. Eng.*, 24, 205–210.
- Eksi, D., Benzer, H., Sargin, A., Genc, O., 2011. A New Method for Determination of Fine Particle Breakage. *Minerals Engineering*, 24, 216-220.
- Epstein, B., 1948. Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids. *Industrial and Engineering Chemistry*, 40 (12), 2289-2291.
- Fandrich, R. G., Clout, J. M. F., Bourgeois, F. S., 1998. The CSIRO Hopkinson Bar Facility for Large Diameter Particle Breakage. *Minerals Engineering*, 11 (39), 803-890.
- Gao, M. E., Forssberg, K. S. E., 1990. Simulation of Batch Grinding of Iron Ore. *Trans. Inst. Min. Metall.*, 199, 142-C146.
- Gardner, R. P., Austin L. G., 1962. A Chemical Engineering Treatment of Batch Grinding. In: H. Rumpf and D. Behrens (Editors), *Proceedings, 1st European Symp. Zerkeimern*. Verlag Chemie, Weinheim, 217-247.
- Genç, Ö., 2002. Klinker ve Çimento Katkılarının Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği, Türkiye.
- Genc, O., 2015. Optimization of a fully air-swept dry grinding cement raw meal ball mill closed circuit capacity with the aid of simulation. *Miner. Eng.*, 74, 1075-1081.
- Herbst, J.A., Fuerstenau D.W., 1968. The Zero Order Production of Fines in Comminution and its Implications in Simulation. *Trans. AIME.*, 241, 538-549.
- Huang, Y. H., Chang, Y. L., Fleiter, T., 2016. A Critical Analysis of Energy Efficiency Improvement Potentials in Taiwan's Cement Industry. *Energy Policy*, 96, 14-26.
- Jankovic, A., Valery, W., Davis, E., 2004. Cement Grinding Optimisation. *Miner. Eng.*, 17,41–50.
- Kelsall, D. F., Reid K. J., 1965. The Derivation of a Mathematical Model for Breakage in a Small Continuous Wet Ball Mill. *Proc. A.I. Ch. E./I.Chem. E. Joint Meeting*, London, June, Section 4, 14-20.
- Krajcinovic, D., 1996. *Damage Mechanics*. Elsevier, Oxford, UK, 159-166.
- Krogh, S. R., 1978. Determination of Crushing and Grinding Characteristics Based on Testing of Single Particles. *Transactions AIME/SME*, 266: 1957-1962.
- Lynch, A. J., 1977. *Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization, Design and Control*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1-65.
- Madlool, N. A., Saidur, R., Hossain, M. S., Rahim, N. A., 2011. A Critical Review on Energy Use Savings in the Cement Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 2042-2060.
- Pauw, O. G., Maré M. S., 1988. The Determination of Optimum Impact-Breakage Routes for an Ore. *Powder Technology*, 54, 3-13.
- Shi, F., Kojovic, T., 2007. Validation of A Model for Impact Breakage Incorporating Particle Size Effect. *International Journal of Mineral Processing*, 82, 156-163.
- Schöenert, K., 1972. Role of Fracture Physics in Understanding Comminution Phenomena. *Transactions of Society of Mining Engineers AIME*, 252, March, 21-26.
- Stewart, P. S. B., Restarick, C. J., 1971. A Comparison of Mechanism of Breakage in Full Scale and Laboratory Scale Grinding Mills. *Proc. Australas. Inst. Min. Metall.*, 239, 81-92.
- Tavares, L. M., King R. P., 1998. Single-particle Fracture Under Impact Loading. *International Journal of Mineral Processing*, 54, 1-28.
- Vogel, L., Peukert, W., 2003. Breakage Behaviour of Different Materials – Construction of a Mastercurve for the Breakage Probability. *Powder Technology*. 129, 101-110.
- Vogel, L., Peukert, W., 2004. Determination of Material Properties Relevant to Grinding by Practicable Lab-scale Milling Tests. *International Journal of Mineral Processing*, 74, 329-338.
- Whiten, W. J., 1974. A Matrix Theory of Comminution Machines. *Chemical Engineering Science*, 29, 588-599.
- Whiten, W. J., 1976. Ball Mill Simulation Using Small Calculators. *Proc. Australas. Inst. Min. Metall.*, 258, 47-53.
- Xie, W., He, Y., Luo, C., Zhang, X., Li, H., Wang, H., Shi, F., 2015. Energy-Size Reduction of Coals in the Hardgrove Machine. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35, 51-62.
- Yashima, S., Kanda Y., Sano S., 1987. Relationships Between Particle Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture as Estimated from Single Particle Crushing. *Powder Technology*, 51, 277-282.