

KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENLER

Stirred Ball Mills

Serkan DİKMEN¹
Ş.Levent ERGÜN²

ÖZET

Son yıllarda karıştırmalı bilyalı değirmenlerin çeşitli sanayi kollarındaki kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Madencilik sektöründe ise ince öğütmeye olan ihtiyacın artmasına ve ekipman boyutlarının büyümesine paralel olarak karıştırmalı bilyalı değirmenler tesislerde kullanılan geleneksel boyut küçültme ekipmanlarına bir alternatif oluşturmaktadırlar. Bu durumun en önemli nedeni; ekipman içerisinde birim hacimde açığa çıkan enerji miktarının geleneksel boyut küçültme ekipmanları ile karşılaştırıldığında çok yüksek olması ve ince boyutlara öğütmenin ekonomik olarak gerçekleştirilebilmesidir. Değirmen içinde gerçekleşen öğütme, stres yoğunluğu ve stres sayısı olarak adlandırılan iki parametre ile tanımlanmaktadır. Her stres yoğunluğu için ürün inceliği ile özgül enerji tüketimi arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde öğütme performansını etkileyen değişkenler, geometrik ve işlem değişkenleri olarak iki ana grup altında toplanmaktadır. Bunlara ek olarak yazıda ekipmanın modellenmesine yönelik değerlendirmeler de tartışılmaktadır.

Anahtar Sözcükler: İnce Öğütme, Karıştırmalı Bilyalı Değirmen, Stres Yoğunluğu, Stres Sayısı

ABSTRACT

In recent years, the importance of stirred ball mills which have applications in various industries, is steadily increasing. With a growing demand for fine grinding and increases in equipment dimensions, stirred ball mills are becoming an attractive alternative for conventional size reduction equipments in the mining industry. Stirred ball mills make fine grinding economically possible because of their high energy distributed per unit volume in the grinding chamber when compared to available grinding equipment. The comminution process in these mills is determined by the stress intensity and the stress number. For each stress intensity, there is a certain relationship between product fineness and specific energy consumption. Variables affecting the grinding performance of these mills can be classified into two major groups on the basis of geometric and operating variables. Additionally, studies related to modelling of this equipment are also discussed in this paper.

Keywords: Fine Grinding, Stirred Ball Mill, Stress Intensity, Stress Number

¹ Araş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, sdikmen@hacettepe.edu.tr

² Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara,

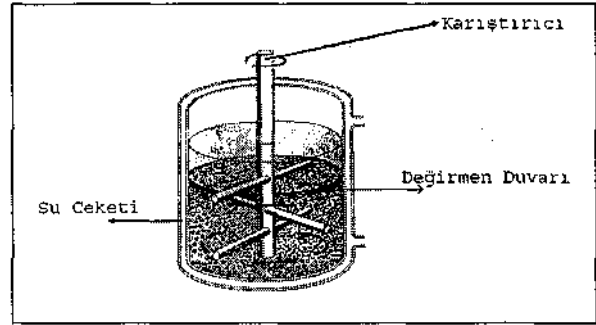
1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile beraber plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik gibi farklı endüstri kollarında ince (<100 um), çok ince (<10 um) veya süper ince (<1 um) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Madencilik sektöründe ise, yüksek tenörlü cevher yataklarının tükenmesi sonucu serbestleşme tane boyutu çok ince olan düşük tenörlü cevher yatakları ve hatta tesis atıkları ekonomik değer kazanmaya başlamıştır. Her iki durum da malzemelerin çok ince boyutlara kadar öğütülmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Buna karşın öğütme, enerjinin en yoğun ve verimsiz olarak tüketildiği birim işlemdir. Özellikle, tane boyutu inceldikçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artması öğütme için harcanması gereken enerji miktarını artırmaktadır. Bu durum, tesis çalışanlarını ve araştırmacıları malzemeleri istenen boyutlara öğütme kapasitesine sahip alternatif boyut küçültme ekipmanları üzerinde düşünmeye zorlamaktadır. Tesislerde kullanılan mevcut ekipmanlarla (bilyalı değirmenler) malzemeleri ekonomik olarak çok ince boyutlara öğütmenin fiziksel olarak mümkün olmaması nedeniyle bazı tesisler ara ürün öğütme devrelerinde karıştırmalı ve titreşimli bilyalı değirmenlerden yararlanırken (Harbort vd., 1999; Young ve Gao, 2000) karıştırmalı bilyalı, jet veya yörüngesel (planetary) tip değirmenler boya, plastik, seramik vb. tesislerinde belirli boyutta malzeme üretmek için kullanılmaktadır. Bu ekipmanların herbiri kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olmakla beraber, son yıllarda madencilik sektöründe karıştırmalı bilyalı değirmenler üzerinde önemle durulmaktadır. Bunun arkasında yatan temel neden, karıştırmalı bilyalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle bu tip ekipmanlarda özgül enerji tüketiminin tamburlu ve titreşimli bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyede kalmasıdır. Bu nedenle, karıştırmalı bilyalı değirmenler son yıllarda araştırma çevreleri tarafından artan bir ilgiyle incelenmektedir.

Bu çalışmada, karıştırmalı bilyalı değirmenlerin yapısı, öğütme me^pizmaları, öğütme üzerinde etkin olan değişkenler ve ekipmanın modellenmesi r hakkında genel bilgiler verilmektedir.

2. KARIŞTIRMALI BİLYALI DEĞİRMENLERİN TEMEL YAPISI

Son 20 yılda endüstriyel alanda ilgi odağı haline gelen karıştırmalı bilyalı değirmenlerin tasarımı aslında 1920'li yıllara kadar uzanmaktadır. O günden bu yana farklı tipte karıştırmalı bilyalı değirmenler tasarlanmış olsa da temel yapıları değişmemiştir. Ekipman temelde çok basittir (Şekil 1). Aşırı ısınmayı önlemek için etrafında bir su ceketi bulunan silindirik bir gövde ve bu gövde içinde yüksek hızda dönen bir karıştırıcıdan oluşmaktadır (Sepulveda, 1981; Tüzün, 1994). Günümüzde, 1 litreden daha küçük laboratuvar ölçekli değirmenler ile gövde net hacmi 3000 litreye ulaşan ve 1100 kW'lık bir motora sahip ekipmanlar bulunmaktadır (Murphy vd., 2004)



Şekil 1. Karıştırmalı bilyalı değirmenin şematik görünümü (Schilling ve Yang, 2000)

Üretilen ilk ekipmanlar, düşük hızlarda çalışmakta (<6 m/sn) ve aşındırıcı (attritor) olarak adlandırılmakta ve çoğunlukla, flotasyon öncesinde mineral yüzeylerinin temizlenmesi amacıyla kullanılmaktaydılar. İlerleyen yıllarda değirmen gövdesinin boy/çap oranının artmasına paralel olarak yüksek karıştırma hızına sahip değirmenler de geliştirilmiştir. Bu ekipmanların ulaştıkları en yüksek hız yaklaşık 20 m/sn'dir. Kullanılan karıştırıcılar farklı tiplerde olabileceği gibi değirmen gövdesi de dik veya yatay olabilir. Bununla beraber, bu farklılığın öğütme mekanizması üzerinde bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Değirmen yaş veya kuru olarak çalıştırılabilir. Değirmen hacminin en fazla %85'i öğütücü ortam ve malzeme ile şarj edilmektedir (Sepulveda, 1981; Tüzün, 1994). Öğütülecek malzemenin tane boyutu dağılımı ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak farklı tipte ve boyutta öğütücü ortam tercih edilmektedir. Ortam, çelik veya seramik bilya, kum, çakıl taşı, izabe cürufu veya otojen öğütme malzemesi olabilirken

kullanılan ortamın boyutu 0,2 ile 8 mm arasında değişmektedir (Kwade, 1999 (a)).

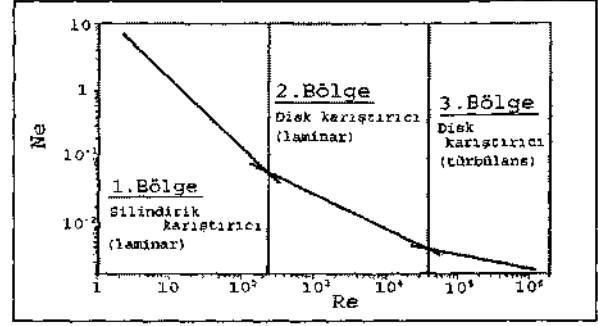
3. DEĞİRMEN İÇİNDEKİ ORTAM HAREKETİ VE ENERJİ DAĞILIMI

Değirmende karıştırıcının dönmeye başlaması ile birlikte değirmen içerisinde kendine özgü bir akış profili oluşmaktadır. Bu akış profili, değirmen içindeki ortam hareketinin yanısıra ekipmanın özgül enerji tüketimini de belirlemektedir. Akış profilinden yararlanılarak değirmen içerisinde oluşan yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgeler ile öğütmede etkin olan kuvvetler hakkında bilgi elde edilebilmektedir (Blecher vd., 1996; Blecher ve Schwedes, 1996; Theuerkauf ve Schwedes, 1999).

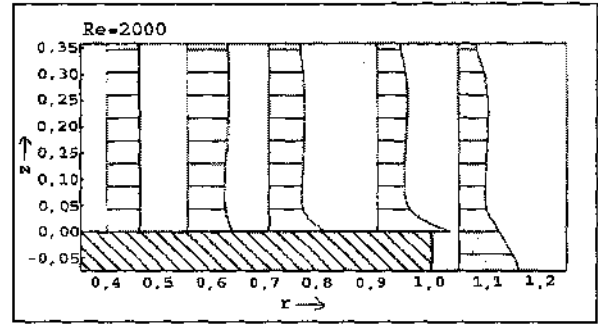
Değirmen içindeki ortam-malzeme karışımının hareket mekanizması oldukça karmaşıktır. Mölls ve Hörnle'e göre, bu hareketi etkileyen 44 değişken bulunmaktadır (Blecher vd., 1996). Akış profilini ve enerji dağılımını belirlemeye yönelik çalışmaların çoğunda hesaplamalar, değirmen içinde laminer akış ve homojen Newton akışkanı (Newtonian fluid) bulunduğu varsayılarak yapılmaktadır. Akış profilleri, CFD teknikleri (computational fluid dynamics) kullanılarak incelenmekte ve daha sonra belirlenen akış profiline göre değirmen içindeki özgül enerji dağılımı hesaplanmaktadır. Sonuçta, öğütücü ortamı oluşturan her tanenin bu akış içindeki hareketi belirlenebilmektedir (Blecher vd., 1996; Blecher ve Schwedes, 1996; Theuerkauf ve Schwedes, 1999; Lane, 1999; Kwade, 1999(a)).

Weit'in değirmende gerçekleşen güç tüketimini belirlemeye yönelik çalışmalarının sonuçları Şekil 2'de Newton (Ne) ve Reynolds (Re) sayıları ile ifade edilmektedir. Burada Newton sayısı değirmenin güç tüketimini belirtmektedir. Şekil 2'den de görülebileceği gibi Reynolds sayısına bağlı olarak belirlenen üç çalışma aralığının herbirinde değirmen içerisinde farklı akış profilleri ve buna bağlı olarak farklı enerji dağılımları oluşmaktadır (Blecher ve Schwedes, 1996).

Akış profilini belirlemeye yönelik araştırmalar laminer akış koşullarının baskın olduğu 1. ve 2. bölgelerde yoğunlaşırken, 3. bölge ile ilgili bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Şekil 3'de, Re=2000 için teğetsel hız gradyanındaki değişim görülmektedir.



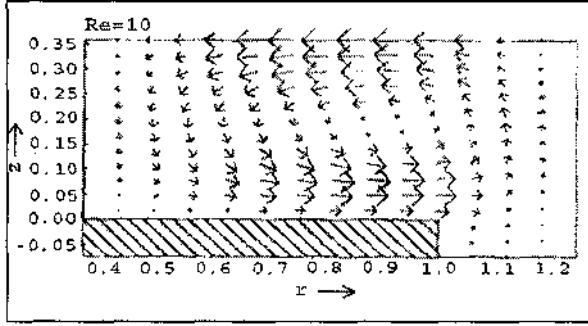
Şekil 2. Karıştırılmalı bilyalı değirmende farklı Reynolds sayıları için oluşan güç bölgeleri (Blecher ve Schwedes, 1996)



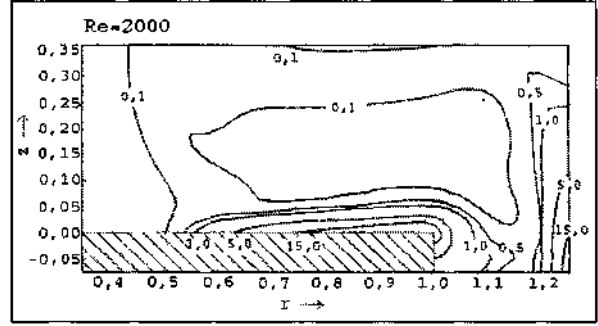
Şekil 3. Teğetsel hız profili, Re=2000 (Blecher ve Schwedes, 1996)

Şeklin sol tarafı karıştırıcı şaftı ile sınırlıyken sağ tarafta değirmen duvarı bulunmaktadır. Taralı alan, karıştırıcı diskini temsil ederken şeklin üst kısmı iki diskin simetri eksenine denk gelmektedir. Şekillerde kullanılan r ve z koordinatları, temsil ettikleri bölge boyutlarının karıştırıcı disk çapına oranları ile ifade edilmektedirler. Şekil 3'de teğetsel hızın yönü kağıt düzlemine diktir. Şekil 3'den de görülebileceği gibi şaft çevresindeki hız gradyanında değişimin olmaması bu bölgede akışkanın çok yavaş hareket ettiğinin bir göstergesidir. Şafttan uzaklaştıkça hız gradyanındaki değişime paralel olarak bir akış profili gelişmeye başlamaktadır ve en yüksek hız gradyanı disk yüzeyinde oluşmaktadır. Şekil 3'de görülen hız profillerinin biçimi incelenen her Reynold sayısı için tipiktir. Reynolds sayısının artması disk çevresinde oluşan akış profillerinde nicel değişimlere neden olmaktadır.

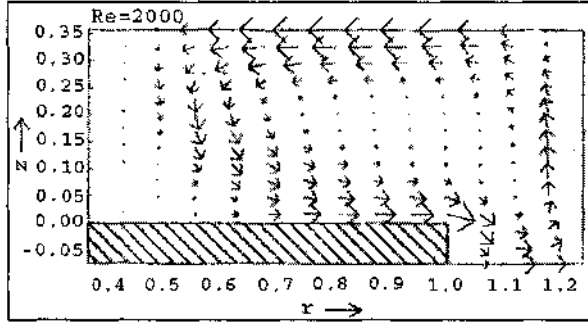
Şekil 4 ve 5'de değirmen içerisinde oluşan özgün hız dağılımları Re=10 ve 2000 için görülmektedir.



Şekil 4. Radyal ve aksensel hızlar, Re=10 (Blecher ve Schwedes, 1996)



Şekil 6. Eş enerji yoğunluğu eğrileri, Re=2000 (Blecher vd, 1996)



Şekil 5. Radyal ve aksensel hızlar, Re=2000 (Blecher ve Schwedes, 1996)

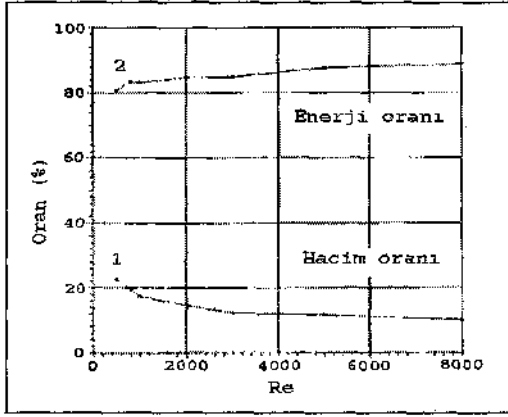
Şekil 4 ve 5'den de anlaşıldığı gibi r-z düzleminde çevrimsel bir hareket söz konusudur. Akış, dönen diskin akışkanı değirmen duvarına hareket ettirmesiyle başlar. Değirmen duvarına ulaşan akışkan burada yukarı doğru yönlendirilir. Daha sonra hareketin devamlılığını sağlamak amacıyla akışkan tekrar hareketin başladığı yer olan shaft yönüne doğru devam eder. Re=2000 için hesaplanan hız dağılımı Şekil 5'de görüleceği gibi konum, şekil ve şiddet itibarıyla farklılık göstermektedir. Bu koşulda, çevrimsel akışın çevresinde yani disk yüzeyinde, iki diskin simetri ekseninde ve değirmen duvarı boyunca daha yüksek hızlara rastlanmaktadır. Temelde, akış profillerindeki değişim değirmen içerisinde farklı özgül enerji dağılımlarının oluşmasına yol açmaktadır (Blecher vd, 1996, Blecher ve Schwedes, 1996).

Değirmen içindeki akış profilleri, başlıca akışkanın hız gradyanı tarafından belirlenen tipik bir özgül enerji dağılımına neden olur. Şekil 6'da Re=2000 için hesaplanan eş enerji yoğunluğu eğrileri görülmektedir.

Şekilde eğriler üzerinde görülen değerler; o nokta için hesaplanan yerel özgül enerjinin,

değirmene verilen ortalama özgül enerjiye oranını belirtmektedir. Yerel özgül enerjinin hesaplanması Blecher vd. (1996)'de ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Ortalama özgül enerji olarak tanımlanan değer ise değirmene verilen toplam enerjinin değirmen hacmine oranıdır. Şekilde görülen 1 değeri, değirmeni farklı bölgelere ayırması nedeniyle önemlidir. Oranın 1'den büyük olduğu bölgelerde yerel özgül enerji ortalama özgül enerjiden daha büyüktür. Bu durumda değirmen içerisinde yüksek enerji yoğunluğuna sahip iki bölgeden söz edebiliriz. Bu bölgelerden biri karıştırıcı disk çevresinde bulunurken diğeri değirmen duvarı boyunca uzanır. Enerji yoğunluğunun artmasının öğütme performansını iyileştirdiği düşünüldüğünde değirmen içinde gerçekleşen öğütmenin yüksek enerji yoğunluğuna sahip bu bölgelerde meydana geldiği düşünülmektedir. Fakat, bu iki bölge değirmen içinde çok küçük bir alanı kaplamaktadır. Şekil 7, bu görüşü doğrulamaktadır.

Şekil 7'de görülen 1 numaralı eğri yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgelerin değirmen hacmi içindeki oranlarını Reynold sayısının bir fonksiyonu olarak ifade etmektedir. 2 numaralı eğri ise değirmene verilen toplam enerjinin ne kadarının bu hacimde dağıldığını göstermektedir. Şekil 7'den de görülebileceği gibi Re=8000 için bu bölgeler değirmen hacmi içinde yaklaşık %10'luk bir alanı kapsarken değirmene verilen toplam enerjinin %90'ı bu bölgelerde dağılmaktadır. Bu örnek, karıştırıcı bilyalı değirmende etkin boyut küçültmenin bu iki küçük yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgede gerçekleştiğine işaret etmektedir (Blecher vd., 1996, Blecher ve Schwedes, 1996).



Şekil 7. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgelerin değirmen hacmine oranı ile bu bölgelerde dağılan enerjinin toplam enerjiye oranı (Blecher ve Schwedes, 1996)

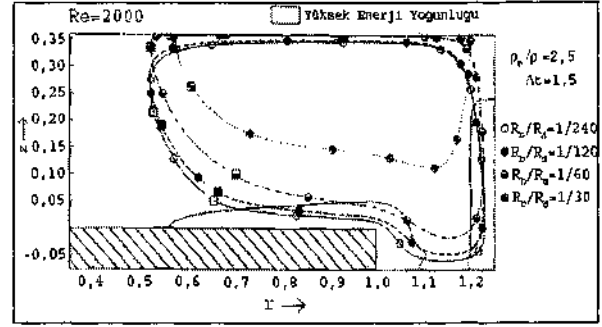
4. TEK BİLYANIN İZLEDİĞİ YÖRÜNGE

Değirmende etkin öğütmenin, yüksek enerji yoğunluğuna sahip bölgelerde gerçekleştiğinin belirlenmesi optimum öğütmenin, öğütücü ortamın bu bölgelerden devamlı olarak geçmesi ile elde edilebileceği düşüncesini doğurmaktadır. Bu nedenle, ortamın değirmen içinde izlediği yörünge üzerinde etkili olan değişkenlerin belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan tüm hesaplamaların sonucunda, ortamı oluşturan her tanenin başlangıç noktasından bağımsız olarak neredeyse sabit bir yörünge üzerinde yol aldığı anlaşılmıştır. Bununla beraber, yörüngenin değirmen içindeki konumunun karıştırıcı disk çapının (R_d) ortam çapına (R_b) oranına, ortam yoğunluğunun (ρ_b) pulp yoğunluğuna (ρ) oranına ve Reynolds sayısına bağlı olduğu belirlenmiştir (Blecher vd, 1996; Blecher ve Schwedes, 1996; Theuerkauf ve Schwedes, 1999).

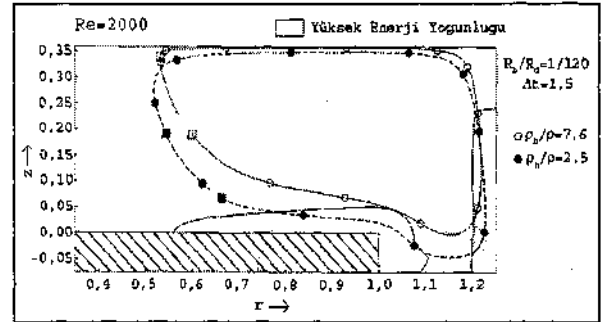
Şekil 8'de farklı çap oranlarının (R_b/R_d) sabit yörünge üzerindeki etkisi görülmektedir. Görülebileceği gibi sadece küçük bilyaların değirmen içinde oluşan yüksek enerjili bölgelerden geçme olasılığı yüksektir. İri bilyaların izlediği yörünge tamamıyla düşük enerjili bölgede bulunmaktadır.

Şekil 9, yoğunluk oranlarının (ρ_b/ρ) yörüngenin konumu üzerindeki etkisini göstermektedir. Oranın artması sonucunda ortam sadece değirmen duvarı boyunca bulunan yüksek enerjili bölgeden geçmektedir.

Son olarak, Reynolds sayısının yörüngenin konumu üzerindeki etkisi Şekil 10'da



Şekil 8. Bilya ve disk çapı arasındaki oranın tane yörüngesinin konumu üzerindeki etkisi (Blecher vd, 1996)



Şekil 9. Bilya ve akışkan yoğunluğu arasındaki oranın tane yörüngesinin konumu üzerindeki etkisi (Blecher vd, 1996)

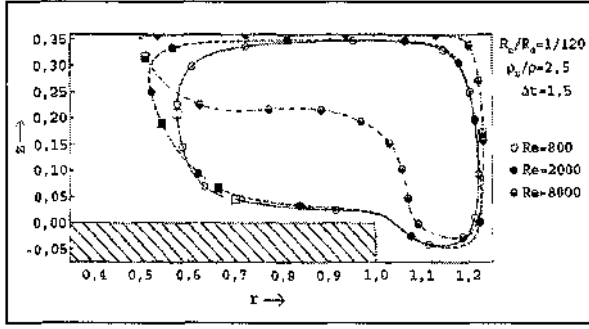
görülmektedir. Şekilde yüksek enerji yoğunluklu bölgeler gösterilmemiştir çünkü bu bölgelerin kapladığı alan Reynolds sayısı ile değişmektedir. Bununla beraber, Reynolds sayısının 800 ve 2000 olduğu durumlarda oluşan yörünge yüksek enerjili bölgelerin bulunacağı disk yüzeyine ve değirmen duvarına yakındır. Re=8000'de oluşan yörüngenin izlediği yol ise düşük enerjili bölgelerin baskın olduğu alanlardan geçmektedir.

Bu üç değişkenin yörüngenin konumu üzerindeki etkisi Hareket indisi (Motion index) adı verilen bir parametre ile tanımlanmaktadır.

Bu eşitlikte,

- R_b : bilya çapı, m
- R_d : karıştırıcı diskin çapı, m
- u_d : karıştırma hızı, m/sn
- ρ_b : bilyanın yoğunluğu, kg/m³
- ρ : akışkanın yoğunluğu, kg/m³
- μ : dinamik viskozite, Pa.s

Düşük hareket indisi değerlerinde, ortam hareketi üzerinde sürüklenme kuvveti (drag force) baskın olduğundan ortam akışkanın akış şeklini



Şekil 10. Reynold sayısının tane yörüngesinin konumu üzerindeki etkisi (Blecher vd, 1996)

$$M_{sb} = [R_b^3 \cdot (\rho_b - \rho) \cdot v_d^2] \cdot \left(\frac{1}{R_d}\right) \cdot \left(\frac{\rho}{\eta^2}\right) \quad (1)$$

izlemekte ve daha sık yüksek enerjili bölgelerden geçmektedir. Bu da daha etkin bir öğütmenin gerçekleşmesine neden olmaktadır. Hareket indisinin değeri arttıkça ortam üzerinde santrifüj kuvvetin etkisi artmaktadır. Bu durumda, ortam akışkanın akış profilini takip etmez ve daha çok düşük enerji yoğunluklu bölgelerden geçer (Blecher vd., 1996).

5. ÖĞÜTMEDE ETKİN OLAN KUVVETLER

Karıştırmalı bilyalı değirmenler, mikron ve mikronaltı inceliklerde öğütme yapabilme kapasitesine sahip ekipmanlardır. Bununla beraber, değirmenin neresinde ve hangi şekilde tanelerin kırılma işlemine maruz kaldığı açık değildir. Değirmen ile belli bir zaman aralığında yeterli boyut küçültmenin sağlanabilmesi iki koşula bağlıdır (Kwade vd, 1996; Kwade, 1999(a), 1999(b); Kwade ve Schwedes, 2002).

Bunlar,

Değirmen içinde birim zamanda meydana gelen çarpışma sayısı (stres sayısı, SN),

Her çarpışmada açığa çıkan enerji miktarıdır (stres yoğunluğu, SI).

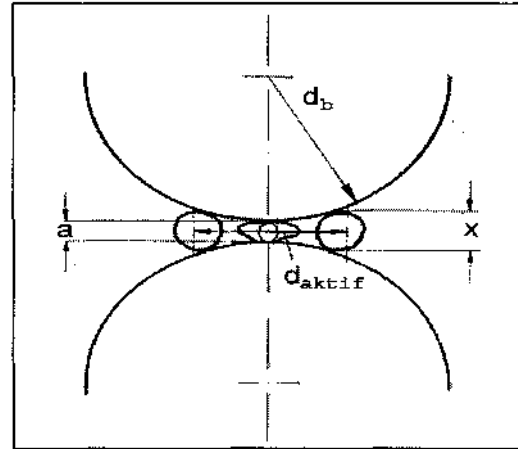
Değirmene beslenen tanelerin kırılabilmesi için tanenin iki bilya veya bilya ile değirmen duvarı arasında yakalanması ve bu çarpışmalarda açığa çıkan enerji yoğunluğunun taneleri kıracak kadar yüksek olması gerekmektedir. Her çarpışmada yakalanan tane sayısı göz önüne alındığında üç farklı durum söz konusudur (Kwade, 1999(b)).

Her seferinde tek tane yakalanmaktadır. Çarpışmada açığa çıkan tüm enerji bu tanenin kırılması için harcanmaktadır.

İki bilya arasında birden fazla tane yakalanmaktadır. Çarpışmada açığa çıkan enerjiden taneler boyutlarıyla orantılı olarak etkilenirler. Yakalanan en iri tane en yüksek enerji ile kırılırken diğerleri gittikçe azalan enerjiye maruz kalırlar.

Taneler iki bilya arasında bir yatak oluşturur.

Yakalanan tane sayısı, süspansiyonun katı konsantrasyonuna ve besleme tane boyutuna bağlı iken iki bilya arasındaki aktif hacmin yarıçapı (d_{aktif}) ile süspansiyondaki iki tane arasındaki ortalama uzaklığın (y) birbirine oranı ile ifade edilebilir (Şekil 11).



Şekil 11. Aktif hacim (Kwade, 1999b)

Buna göre aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

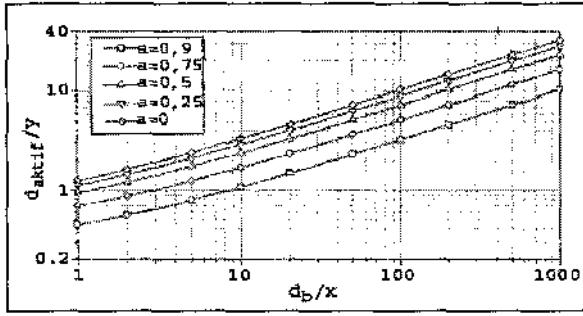
$$\frac{d_{aktif}}{y} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot c_v}{\pi} \cdot \sqrt{2 \cdot (1-a') \cdot \frac{R_b}{x} + 1 - a'^2}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte,

$$a = \frac{a'}{x}$$

c_v : katı konsantrasyonu, % hacimce
 a' : iki bilya arasındaki minimum mesafe, m
 R_b : bilya çapı, m
 x : tane boyu, m

Şekil 12'de katı konsantrasyonunun hacimce %20 olduğu bir süspansiyonda farklı a' değerleri için elde edilen d_{aktif}/y oranı bilya çapının (R_b) tane boyutuna (x) oranının bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir.



Şekil 12. Farklı a' değerleri için iki bilya arasında yakalanan tane sayısı (Kwade, 1999(b))

Şekil 12'den de görülebileceği gibi FVx oranının artması (bilya çapı sabit) iki bilya arasında yakalanan tane sayısını artırmaktadır. Bu durumda, ortalama tane boyunun 2 mikrondan ince olduğu durumlarda birden fazla tane yakalanmaktadır. Bununla beraber, sadece tane boyutunun çok ince olduğu durumlarda ($x_{50} < 1$ um) iki bilya arasında bir yatak oluşmaktadır (Kwade vd., 1996; Kwade, 1999a, 1999b; Kwade ve Schwedes, 2002).

Çarpışmaların stres yoğunlukları ile ilgili ilişkiler boyut küçültmenin değirmen içerisinde nerede ve nasıl oluştuğunun belirlenmesi ile ortaya çıkarılabilir. Bilya hareketlerinin izlenmesi sonucunda araştırmacılar üç farklı öğütme mekanizmasının üzerinde durmaktadırlar (Kwade vd., 1996; Kwade, 1999(a), 1999(b)).

- Karıştırıcı etrafında bulunan bilyalar değirmen duvarına doğru ivmelendirilirler ve bu sırada kinetik enerji kazanırlar. Bu enerji, tanelerin öğütülmesinde harcanmaktadır.
- Öğütücü ortam santrifüj kuvvetin etkisi ile değirmen duvarında bir baskı oluşturmaktadır. Bu bölgede, bilyalar arasında yakalanan taneler oluşan basınç nedeni ile kırılmaktadırlar.
- Değirmen içinde bilyalar farklı hızlarda hareket etmektedirler. Yüksek hızda dönen bilyalar düşük hızda dönen bilyalar ile çarpıştıklarında bir kısım enerjilerini kaybederler ki bu enerji öğütmede kullanılmaktadır.

5.1. Çarpışmalarda Açığa Çıkan Enerjinin (Stres Yoğunluğu) Belirlenmesi

Öne sürülen ilk mekanizmada, bilya karıştırıcı tarafından değirmen duvarına doğru ivmelendirilmektedir. Bunun sonucunda, bilya belli bir kinetik enerji kazanır. Bu durumda, stres

yoğunluğu buyanın kinetik enerjisi ve yakalanan tanenin hacmi ile orantılıdır (Eşitlik 3).

$$E_{v,b} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \left(\frac{R_s}{R_d}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{R_b}{x}\right)^3 \cdot (\rho_b - \rho_{palp}) \cdot u_b^2 \quad (3)$$

Eşitlikte,

R_s	: karıştırıcı şaftın çapı, m
R_d	: disk çapı, m
R_b	: bilya çapı, m
x	: tane boyu, m
P_b	: bilya yoğunluğu, kg/m^3
P_{palp}	: palp yoğunluğu, kg/m^3
U_b	: bilya hızı, m/sn

İkinci mekanizmada, değirmen duvarı yakınında bilyaların radyal hızlarının olmadığı kabul edilmektedir. Bilyalar, santrifüj kuvvet nedeniyle değirmen duvarına baskı oluştururlar. Bu durumda, enerji santrifüj kuvvet ve yakalanan tanenin kesit alanı ile orantılıdır (Eşitlik 4).

$$A_p = 3 V X \int \frac{R}{v R_d} \cdot U, - P_{palp} W, \quad (4)$$

Eşitlikte,

R_d	: disk çapı, m
R_b	: bilya çapı, m
x	: tane boyu, m
P_b	: bilya yoğunluğu, kg/m^3
P_{palp}	: palp yoğunluğu, kg/m^3
U_b	: bilya hızı, m/sn

Önerilen son mekanizmada, farklı hızlarda hareket eden bilyalar çarpışmaktadırlar. Bilyaların teğetsel hızları radyal ve eksensel hızlarından çok daha yüksek olduğundan bilyaların sadece bu yöndeki hareketleri göz önüne alınmaktadır. Farklı teğetsel hızlara $u_{b,1}$ ve $U_{b,1} (U_{b,1} > u_{b,2})$ sahip olan iki buyanın kinetik enerjileri de farklı olacaktır. İki bilya arasında elastik olmayan bir çarpışmanın gerçekleştiği ve hızlı buyanın çarpışma sonrası hızının ($u_{b,1}$) yavaş buyanın hızına ($u_{b,2}$) azaldığı varsayılmaktadır. Hızlı buyanın çarpışmadan önceki ve sonraki kinetik enerjileri arasındaki fark yakalanan taneye aktarılan enerjiye eşittir.

$$A E_{u_n} = - \frac{R}{U_i} \cdot A \cdot fe \cdot \langle_2 \rangle, \quad (5)$$

Eşitlikte,

R_b : bilya çapı, m
X : tane boyu, m
P_b : bilya yoğunluğu, kg/m³
U_{b1} ve u_{b2} : bilya hızları, m/sn

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak üç öğütme mekanizması için hesaplanan stres yoğunluklarının farklı boyuttaki taneler üzerindeki etkileri incelenmiştir. B mekanizmasında elde edilen stres yoğunluğu en iri bilyalar kullanılsa bile sadece 10 um'dan daha ince taneleri kırabileceği belirlenmiştir. Sadece, A ve C mekanizmaları için hesaplanan stres yoğunlukları iri tanelerin öğütülebilmesi için yeterli görünmektedir (Kwade vd., 1996; Kwade, 1999(b)).

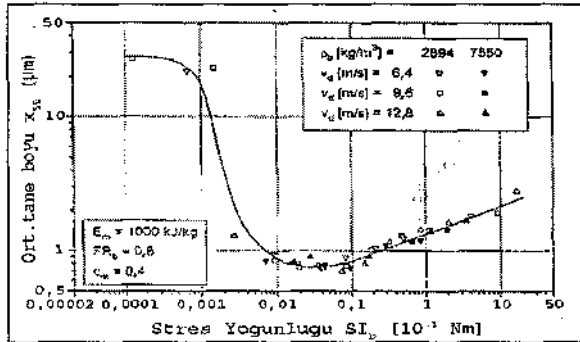
Yukarıda farklı kırılma mekanizmaları için hesaplanan stres yoğunlukları incelendiğinde üç ortak değişken içerdikleri görülmektedir. Bunlar, karıştırıcı hızı ile kullanılan öğütücü ortamın boyutu ve yoğunluğudur.

$$SI = R_b^3 \cdot (\rho_b - \rho_{palp}) \cdot v_b^2 \quad (6)$$

Eşitlikte,

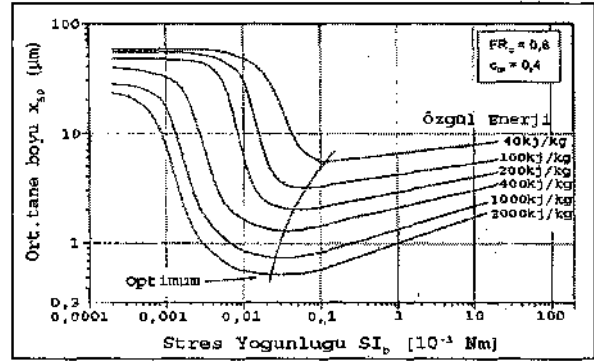
SI : stres yoğunluğu, N.m
R_b : bilya çapı, m
P_b : bilya yoğunluğu, kg/m³
P_{palp} : palp yoğunluğu, kg/m³
u_b : bilya hızı, m/sn

Şekil 13'de özgül enerji girdisinin sabit tutulduğu koşulda stres yoğunluğunun ürün inceliğini nasıl etkilediği görülmektedir.



Şekil 13. Özgül enerji tüketiminin 1000 kJ/kg olduğu durumda stres yoğunluğu ile ortalama tane boyu (x50) arasındaki ilişki (Kwade vd., 1996)

Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde özgül enerji ve stres yoğunluğu öğütme performansını belirleyen iki ana değişkendir. Düşük stres yoğunlukları taneleri kırmaya yeterli olmadığından ya daha fazla enerji verilmeli ya da stres sayısı artırılmalıdır. Stres yoğunluğunun artması ile ürün inceliği belli bir değere kadar azalmaktadır. Bu noktada stres yoğunluğu optimum değerindedir. Stres yoğunluğunun daha da artması ürün inceliğinin yükselmesine neden olmaktadır. Şekil 14'de farklı özgül enerji seviyelerinde ürün inceliği ile stres yoğunluğu arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 14. Farklı özgül enerji tüketiminde stres yoğunluğu ile ortalama tane boyu (x₅₀) arasındaki ilişki (Kwade vd., 1996)

5.2. Stres Sayısının Belirlenmesi

Yukarıda belirtildiği gibi, öğütme işlemi özgül enerji ve stres yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Özgül enerji, değirmen içinde meydana gelen çarpışmalarda açığa çıkan toplam enerji miktarı ile orantılı olduğundan öğütme işlemi stres sayısı yani çarpışma sayısı ile de ilişkilendirilebilir.

$$E_{oc}SISN \quad (7)$$

Kesikli bir öğütme işleminde birim zamanda meydana gelen stres sayısı (SN), bilyaların temas sayısı (N_c), tanelerin yakalanma ve kırılma olasılığı (P_s) ve değirmen içindeki tane sayısı (N_p) ile orantılıdır.

$$SN = \frac{N_c \cdot P_s}{N_p} \quad (8)$$

Bilyaların temas sayısı karıştırıcı devri ve değirmendeki bilya sayısı ile orantılı olduğu varsayılırsa aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$N_c \propto n \cdot V_o^{-f_1} \cdot (1-\varepsilon)^{-c_v} \quad (9)$$

n : karıştırıcı devri, rpm
 t : öğütme süresi, dakika
 V_D : değirmen hacmi, m³
 $\langle P_b$: dolum oranı, %
 ε : bilyalar arası boşluk oranı, %
 R_b : bilya çapı, m

Tanelerin yakalanma ve kırılma olasılığı herşeyden önce değirmen içinde baskın olan öğütme mekanizmasına bağlıdır. Değirmen içinde kristal kafes yapısına sahip bir malzemenin öğütülmesi durumunda bu oran iki bilya arasındaki aktif hacim dolayısı ile bilya çapı ile orantılıdır.

$$P_s - R_b \quad (10)$$

R_h : bilya çapı, m

Değirmen içindeki tane sayısı tüm tanelerin hacmi ile orantılıdır.

$$N_{p,oc} \propto V_D \cdot (1-\varepsilon)^{-c_v} \cdot (1-\varepsilon)^{-c_v} \quad (11)$$

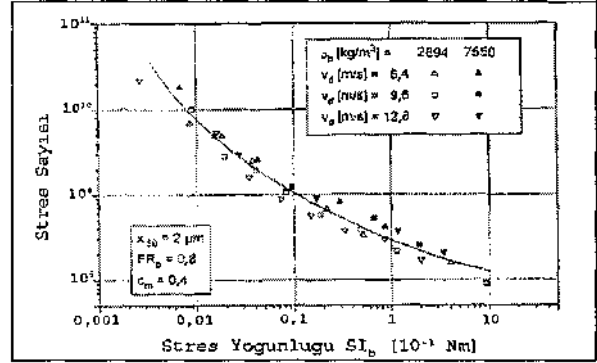
V_D : değirmen hacmi, m³
 $\langle P_b$: dolum oranı, %
 ε : bilyalar arası boşluk oranı, %
 c_v : katı konsantrasyonu, % hacimce
 x : ortalama tane boyu, m

Eşitlik 9, 10 ve 11, Eşitlik 8'de yerine konulduğunda stres sayısı tanımlanabilir.

$$SN \propto n \cdot t \cdot \frac{\varphi_b \cdot (1-\varepsilon)}{(1-\varphi_b(1-\varepsilon)) \cdot c_v} \cdot \frac{x^3}{R_b^2} \quad (12)$$

$\langle p_b$: dolum oranı, %
 ε : bilyalar arası boşluk oranı, %
 c_v : katı konsantrasyonu, % hacimce
 n : karıştırıcı devri, rpm
 t : Öğütme süresi, dakika
 R_b : bilya çapı, m
 x : ortalama tane boyu, m

Şekil 15'de stres sayısı ile stres yoğunluğu arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 15'den, çarpışmada açığa çıkan enerjinin (stres



Şekil 15. Stres yoğunluğu ile stres sayısı arasındaki ilişki (Kwade vd., 1996)

yoğunluğu) azalması aynı ürün inceliğine ulaşmak için daha fazla çarpışmanın gerekli olduğu görülmektedir (Kwade vd., 1996; Kwade, 1999(a), 1999(b)).

Kwade ve Schwedes (2002), işlem parametrelerinin stres yoğunluğu ve stres sayısı sabit kalacak şekilde seçildiği sürece ürün inceliğinin aynı kalacağını ileri sürmektedirler.

6. OĞUTME ÜZERİNDE ETKİN OLAN DEĞİŞKENLER

Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde öğütme birim işlemi üzerinde etkin olan değişkenler, tasarım ve işlem değişkenleri olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir.

6.1. Tasarım Değişkenleri

Bu grupta değirmenin boy/çap oranı, karıştırıcı tipi, konumu ve sayısı, karıştırıcı şaft üzerinde bulunan disk veya çubuklar arasındaki uzaklık, disk veya çubukların boyutları ve şaft üzerindeki konumları vb. gibi tasarım ile ilgili değişkenler bulunmaktadır (Tüzün, 1994). Ayrıca, bazı ekipmanlarda öğütme performansını iyileştirdiği öne sürülen ek parçalar da bulunmaktadır. Örneğin, Maxmill® olarak adlandırılan ekipmanda değirmen gövdesinin de dönmesi sağlanırken değirmen gövdesi içinde malzeme akışını değiştiren sabit bir plaka bulunmaktadır (Dürr, 2002). Benzer şekilde, Draismill® olarak adlandırılan ekipmanın değirmen duvarı üzerinde duvara dik olarak yerleştirilen sabit çubuklar bulunmaktadır (Tüzün, 1994). Tasarımlardaki bu farklılıklar değirmen içinde oluşan akış profillerini dolayısıyla bilya hareketlerini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Buna karşın, farklı tasarımları karşılaştıran bir çalışma bulunmamaktadır.

6.2. İşlem Değişkenleri

Literatürde karıştırmalı bilya.li değirmenlerin öğütme performansını etkileyen işlem değişkenlerinin incelendiği pek çok araştırma bulunmaktadır (Mankosa vd., 1986; 1989; Gao ve Forsberg, 1993; Persson ve Forsberg, 1994; Tüzün vd., 1995; Zheng vd., 1996; 1997; Kapur vd., 1996; Belaroui vd., 1999; Bernhardt vd., 1999; Bel Fadhel vd., 1999; Kwade, 1999 (a); Bel Fadhel ve Frances, 2001; Jankovic, 2003). Bu çalışmaların sonuçları ve yukarıda bahsedilen öğütme mekanizmalarında belirtilen stres yoğunluğu ve sayısı göz önüne alındığında bazı ortak değişkenlerden söz etmek mümkündür. Bu değişkenler karıştırma hızı, bilya yoğunluğu, boyu ve şarj oranı, palp yoğunluğu veya viskozitedir.

6.2.1. Karıştırma Hızının Öğütme Üzerindeki Etkisi

Diğer değişkenler sabit tutulup farklı karıştırma hızlarının öğütme üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda, hızın artması elde edilen ürünün tane boyutu dağılımını inceletirdiği görülmektedir. Aynı zamanda, değirmenin çektiği güç de çalışmanın yapıldığı karıştırma hızları için doğrusal olarak artmaktadır. Bunun sonucunda, değirmenin birim hacminde harcanan özgül enerji miktarında bir artış olmaktadır. Bu da, istenen ürün tane boyutuna ulaşmak için gerekli öğütme süresinde belirgin bir azalmanın olmasını sağlamaktadır. Böylece değirmen kapasitesinde bir artış gerçekleşmektedir (Mankosa vd., 1989; Gao ve Forsberg, 1993; Tüzün, 1994; Bel-Fadhel ve Frances, 2001).

6.2.2. Bilya Boyutu, Yoğunluğu ve Şarj Oranı

Bilya boyutunun incelendiği çalışmalarda ince bilya kullanılması ile ürün tane boyutunun incelendiği görülmektedir. Bu eğilim besleme tane boyutu ile orantılı olarak belli bir bilya boyutuna kadar devam etmektedir. Daha ince bilyaların kullanılması durumunda bilyalar besleme içinde bulunan iri taneleri yakalayamamaktadır. Yapılan çalışmalarda bilya boyutu ile tane boyutu arasındaki optimum oranın merdaneli kırıcılarıdaki kavrama açısı göz önüne alındığında 7:1 ile 20:1 arasında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, ince bilya kullanılması durumunda çarpışmalarda açığa çıkan enerji miktarının azalması iri tanelerin kırılmasında olumsuzluk yaratmaktadır (Mankosa vd., 1986; Tüzün, 1994; Zheng vd., 1996). Tüzün (1994) çalışmasında,

karıştırma hızı ile bilya boyunun öğütme performansı üzerinde içsel bir etkileşimi olduğunu gözlemiştir. Çalışmanın sonucu, iri bilya kullanılması durumunda düşük karıştırma hızının, ince bilya kullanılması durumunda ise yüksek karıştırma hızının öğütme üzerinde daha etkili olduğunu göstermektedir.

Karıştırmalı bilyalı değirmenlerde harcanan enerjinin büyük bir bölümü bilya yükünün hareket ettirilmesi için kullanılmaktadır. Bu nedenle, eğer öğütme performansını etkilemeden bilya yoğunluğu düşürülebilirse, enerji tüketiminde azalma sağlanabilir. Bu amaçla farklı yoğunluktaki bilyaların öğütme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Düşük yoğunluklu bilyalar (steatit, cam, otojen malzeme vb.) özellikle düşük karıştırma hızı ve iri besleme kullanıldığında yüksek yoğunluklu bilyalara (çelik, demir vb.) oranla öğütmede daha verimsizdirler. Bunun nedeni, karıştırmalı bilyalı değirmenlerde basma kuvvetinin makaslama kuvveti kadar etkin olmasıdır. Bununla beraber, eğer üründe demir kirlenmesi istenmiyorsa öğütücü ortam olarak farklı malzemeler tercih edilebilir (Mankosa vd., 1989; Gao ve Forsberg, 1993; Tüzün, 1994).

Tüzün (1994) ayrıca çalışmasında bilya şarjının ürün inceliği üzerindeki etkisini de incelemiştir. Deneyleri gerçekleştirdiği koşullarda aynı enerji tüketimi için bilya şarjının ürün inceliğini değiştirmediyi fakat değirmenin çektiği gücün doğrusal olarak arttığını belirlemiştir. Bununla beraber, Jankovic (2001) özellikle dik karıştırmalı bilyalı değirmenlerde bilya şarjı ile orantılı olarak artan yerçekimi etkisinin stres yoğunluğunun hesaplandığı eşitliğe dahil edilmesi gerektiğini belirtmektedir.

6.2.3. Palp Yoğunluğu

Yapılan çalışmalar palp yoğunluğunun ürün inceliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Çalışmaların sonuçları incelendiğinde, palp yoğunluğunun artması ürün inceliğini artırdığı gözlenmektedir. Bununla beraber, palp katı oranının ağırlıkça %75'in üzerine çıkması halinde tanelerin kırılma hızları düşmektedir. Bu durum özellikle besleme tane boyutu dağılımının ince olması halinde daha da belirgin hale gelmektedir. Bunun temel nedeni palp içerisinde ince boydaki tanelerin palp viskozitesini artırmasıdır. Ayrıca öğütme sonucunda oluşan ince tanelerde palp viskozitesinin daha da yükselmesine neden olmakta ve öğütme performansını

azaltılmaktadır (Tüzün, 1994; Zheng vd., 1996; Belaroui vd., 1999; Bernhardt vd., 1999). Bu olumsuzluğu gidermek için çeşitli öğütme yardımcılarını kullanılmaktadır. Bu reaktifler tane yüzeylerine soğurularak tanelerin yüzey yüklerini -zeta potansiyellerini- artırmakta ve görünür viskozitenin düşmesini sağlamaktadırlar. Öğütme yardımcısı olarak kullanılan bu reaktifler özellikle yüksek katı konsantrasyonuna sahip palpların akıcılığını artırarak değirmenin yüksek kapasitede çalışmasına yardımcı olmaktadır (Kapur vd., 1996; Zheng vd., 1997; Bernhardt vd., 1999;).

7. MODELLEME ÇALIŞMALARI

Son yıllarda karıştırmalı bilyalı değirmenlerde öğütme işleminin simülasyonuna yönelik çalışmalar giderek artmaktadır. Bu çalışmaların çoğunda ürün tane boyutu dağılımının zamana veya özgül enerji tüketimine bağlı değişimi popülasyon denge (population balance) modeli yani her boyut fraksiyonu için madde denkliğine dayanan modelleme yaklaşımıyla belirlenmektedir. Diğer boyut küçültme ekipmanlarının modellenmesine yönelik araştırmalardan da iyi bilindiği gibi popülasyon denge modelinde karşılaşılan en önemli sorun tanelerin boyuta bağlı kırılma hızlarının ve kırılma dağılım fonksiyonunun doğru olarak belirlenmesidir. Çalışmalarda model parametrelerinin belirlenmesi amacıyla dar tane boyu dağılımına sahip besleme malzemeleri kullanılmaktadır. Bununla beraber, çok ince tane boyutlarında bu tip dar tane boyutunda malzeme hazırlamak laboratuvar elekleri ile sağlıklı olamamaktadır. Aynı zamanda, ince öğütme işlemlerinin modellenmesinde kullanılan model parametrelerinin zamana bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir. Bu nedenle, geliştirilen modelin tahmin gücü öğütme süresi uzadıkça azalmaktadır (Berthiaux vd., 1996; Varinot vd., 1999; Varinot vd., 1997; Koka ve Trass, 1985; Heim vd., 1985; Ma vd., 1998; Heim ve Leszczyniecki, 1985; Wang ve Forssberg, 2000; Tüzün vd., 1995).

Bazı çalışmalarda modelleme amacıyla enerji-boyut küçültme yaklaşımı da kullanılmaktadır. Bu amaçla çoğunlukla Charles eşitliğinden yararlanılmaktadır (Charles, 1957). Bu yaklaşım kullanılarak iyi çözümler elde edilmesine karşın bir boyut dağılım yerine tek bir tane boyutu göz önüne alınmaktadır (Sepulveda, 1981; Gao ve Forssberg, 1995).

8. SONUÇ

Endüstride çok ince boyutdaki malzemeye olan ihtiyaç gelecekte daha da artacaktır. Karıştırmalı bilyalı değirmenlerin geleneksel değirmenlerle karşılaştırıldığında daha düşük enerji tüketimi olması nedeni ile endüstrideki kullanımlarının daha da artması beklenmektedir. Gelecekteki araştırmalar daha ince bilya kullanan ve bu sayede daha ince ürün elde edilebilecek ekipmanlar üzerinde yoğunlaşacaktır. Ayrıca, ekipmanın ölçek büyütmesi ve işlem sırasında karşılaşılan bazı sorunların örneğin kuru öğütme sırasında bilyaların çıkış ızgarasını tıkaması veya öğütme yardımcılarının etkisi de gelecekteki araştırmaların konusunu oluşturacaktır. Bununla beraber, ekipmanın modellenmesi yönünde yapılacak araştırmalar sonucunda tahmin gücü yüksek bir simülasyon programının geliştirilmesi farklı işlem koşullarında ekipmanın öğütme performansının önceden tahmin edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Becker, M., Kwade, A. and Schwedes, J., 2001, "Stress Intensity in Stirred Media Mills and Its Effect on Specific Energy Requirement", *Int. J. of Miner. Proa*, 61, 189-208.

Belaroui, K., Pons, M.N., Vivier, H. and Meijer, M., 1999, "Wet Grinding of Gibbsite in a Bead Mill", *Powder Technology*, 105, 369-405.

Bel-Fadhel, H., Frances, C. ve Mamourian, A., 1999, "Investigations on Ultra-Fine Grinding of Titanium Dioxide in a Stirred Media Mill", *Powder Technology*, 105, 362-373.

Bel-Fadhel, H. and Frances, C., 2001, "Wet Batch Grinding of Alumina Hydrate in a Stirred Bead Mill", *Powder Technology*, 119, 257-268.

Bernhardt, C., Reinsch, E. and Husemann, K., 1999, "The Influence of Suspension Properties on Ultra-Fine Grinding in Stirred Ball Mills", *Powder Technology*, 105, 357-361.

Berthiaux, H., Varinot, C. and Dodds, J., 1996, "Approximate Calculation of Breakage Parameters from Batch Grinding Tests", *Chemical Engineering Science*, 51, (19), 4509-4516.

- Blecher, L., Kwade, A. and Schwedes, J., 1996, "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in a Stirred Media Mill. Part 1: Energy Density Distribution and Motion of Single Grinding Beads", *Powder Technology*, **86**, 59-68.
- Blecher, L. and Schwedes, J., 1996, "Energy Distribution and Particle Trajectories in a Grinding Chamber of a Stirred Ball Mill", *Int. J. of Miner. Proa*, **44-45**, 617-627.
- Charles, R.J., 1957, "Energy-Size Reduction Relationships in Comminution", *AIME Transactions*, January, 80-88.
- Dürr, H.M., 2002, "Maxxmill® - The Alternative to the Drum Mill", 10th European Symposium on Comminution, 2-5 September, Heidelberg, Germany.
- Gao, M.W. and Forssberg, E., 1993, "A Study on the Effect of Parameters in Stirred Ball Milling", *Int. J. of Miner. Proa*, **37**, 45-59.
- Gao, M. and Forssberg, E., 1995, "Prediction of Product Size Distributions for a Stirred Ball Mill", *Powder Technology*, **84**, 101-106.
- Harbort, G., Murphy, A., Vargas, A. and Young, M., 1999, "The Introduction of the IsaMill for Ultrafine Grinding in the Mt Isa Lead/Zinc Concentrator", *Extemin99*, Arequipa, Peru.
- Heim, A., Leszczyniecki, R. ve Amanowicz, K., 1985, "Determination of Parameters for Wet-Grinding Model in Perl Mills", *Powder Technology*, **41**, 173-179.
- Heim, A. and Leszczyniecki, R., 1985, "A Study on Grinding and Energy Input in a Vertical Multi-Disk Batch Pearl Mill", *Aufbereitungs-Technik*, (10), 594-604.
- Jankovic, A., 2001, "Media Stress Intensity Analysis for Vertical Stirred Mills", *Minerals Engineering*, **14**, (10), 1177-1186.
- Jankovic, A., 2003, "Variables Affecting the Fine Grinding of Minerals Using Stirred Mills", *Minerals Engineering*, **16**, 337-345.
- Kapur, P.C., Healy T.W., Scales, P.J., Boger, D.V. and Wilson, D., 1996, "Role of Dispersants in Kinetics and Energetics of Stirred Ball Mill Grinding", *Int. J. of Miner. Proa*, **47**, 141-152.
- Koka, V.R. and Trass, O., 1985, "Analysis of the Kinetics of Coal Breakage by Wet Grinding in the Szego Mill", *Powder Technology*, **43**, 287-294.
- Kwade, A., Blecher, L. and Schwedes, J., 1996, "Motion and Stress Intensity of Grinding Beads in a Stirred Media Mill. Part 2: Stress Intensity and Its Effect on Comminution", *Powder Technology*, **86**, 69-76.
- Kwade, A., 1999 (a), "Wet Comminution in Stirred Media Mills - Research and Its Practical Application", *Powder Technology*, **105**, 14-20.
- Kwade, A., 1999 (b), "Determination of the Most Important Grinding Mechanism in Stirred Media Mills by Calculating Stress Intensity and Stress Number", *Powder Technology*, **105**, 382-388.
- Kwade, A. and Schwedes, J., 2002, "Breaking Characteristics of Different Materials and Their Effect on Stress Intensity and Stress Number in Stirred Media Mills", *Powder Technology*, **122**, 109-121.
- Lane, G. L., 1999, "CFD Modelling of a Stirred Bead Mill for Fine Grinding", 2nd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December, 449-454.
- Ma, Z., Hu, S., Zhang, S. and Pan, X., 1998, "Breakage Behaviour of Quartz in a Laboratory Stirred Ball Mill", *Powder Technology*, **100**, 69-73.
- Mankosa, M.J., Adel, G.T. and Yoon, R.H., 1986, "Effect of Media Size in Stirred Ball Mill Grinding of Coal", *Powder Technology*, **49**, 75-82.
- Mankosa, M.J., Adel, G.T. and Yoon, R.H., 1989, "Effect of Operating Parameters in Stirred Ball Mill Grinding of Coal", *Powder Technology*, **59**, 255-260.
- Murphy, A., Gao, M. ve Vargas, A., 2004, "IsaMill. New Tool for Improving Plant Recoveries", www.xstratech.com/downloads/im_newtool.pdf
- Persson, H. ve Forssberg, E., 1994, "Fine Grinding of a Magnetite Ore with a Stirred Ball Mill", *Aufbereitung-Technik*, **35**, (6), 307-319.
- Scilling, R.E. and Yang, M., 2000, "Attritor Grinding Mills and New Developments", *Panamerican Coatings 2000*, Mexico City, Mexico.

Sepulveda, J.L., 1981, "A Detailed Study on Stir red Ball Mill Grinding", Doktora Tezi, Department of Metallurgy and Metallurgical Engineering, The University of Utah.

Theuerkauf, J. and Schwedes, J., 1999, "Theoretical and Experimental Investigation on Particle and Fluid Motion in Stirred Media Mills", Powder Technology, **105**, 406-412.

Tüzün, M.A., 1994, "A Study of Comminution in a Vertical Stirred Ball Mill", Doktora Tezi, Chemical Engineering Department, University of Natal.

Tüzün, M.A., Loveday, B.K. and Hindle, A.L., 1995, "Effect of Pin Tip Velocity, Ball Density and Ball Size on Grinding Kinetics in a Stirred Ball Mill", Int. J. of Miner. Proc, 43, 179-191.

Varinot, C, Hiltgun, S., Pons, M.N., and Dodds, J., 1997, "Identification of the Fragmentation Mechanisms in Wet-Phase Fine Grinding in a Stirred Bead Mill", Chemical Engineering Science, 52, (20), 3605-3612,

Varinot, C., Berthiaux, H. and Dodds, J., 1999, "Prediction of the Product Size Distribution in Associations of Stirred Bead Mills", Powder Technology, **105**, 228-236.

Wang, Y. and Forssberg, E., 2000, "Product Size Distribution in Stirred Media Mills", Minerals Engineering, 13, (4), 59-465.

Young, M.F. and Gao, M., 2000, "Performance of the IsaMills in the George Fisher Flowsheet", AusIMM Seventh Mill Operators Conference, Australia.

Zheng, J., Harris, C.C. and Somasundaran, P., 1996, "A Study on Grinding and Energy Input in Stirred Media Mills", Powder Technology, 86, 171-178.

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

www.tr.net info@tr.net

TR.NET

TÜRKİYE'NİN İNTERNETİ

Yeni yılın
sağlık, başarı ve mutluluk
getirmesi dileğiyle...

2005



Merkez: ODTÜ Teknokent İkizleri, İnönü Bulvarı, 06531, Ankara

Telefon: (0312) 295 9000 Faks: (0312) 295 9494

Ankara: Anadolu Bulvarı, Çamlık Sokak 3, Maçunköy, 06370

Telefon: (0312) 591 0050 Faks: (0312) 591 0099 Help Desk: (0312) 295 9595

İstanbul: Halaskargazi Caddesi 351, Kat: 2, Şişli, 80220

Telefon: (0212) 233 7667 Faks: (0212) 241 1312 Help Desk: (0216) 542 9000