

Klinkerin Öğütme Kinetiği ve Ürünlerin Boyut Dağılımının Simülasyonu

M. Yekeler, A. Özkan, Ö. Kaya ve F. Coşgun

Cumhuriyet Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, SİVAS

ÖZET: Değişik besleme boyutundaki çimento klinkerlerinin laboratuvar ölçekli değirmen kullanarak öğütme kinetiği incelenmiştir. Öğütme kinetiği prosesi 1. derecedendir ve spesifik kırılma hızı değerleri (S_i) besleme boyutları azaldıkça azalmıştır. Ancak, beklenenin aksine tüm boyutlar için aynı olması gereken toplam kırılma dağılım fonksiyonu değerleri (B_y) değişmiştir. Laboratuvar ölçekli bilyalı değirmen kullanılarak elde edilen kırılma parametreleri, klinker ürünlerinin boyut dağılımlarının simülasyonlarını yapmak için kullanılmıştır. Sonuç olarak, simülasyonla elde edilen ürün boyut dağılımlarının deneysel değerlerle çok uyumlu olduğu görülmüştür.

ABSTRACT: The kinetics of dry grinding of various feed sizes of cement clinkers was investigated in a laboratory tumbling ball mill. The grinding kinetics process is first order, and the S_i values (specific rates of breakage) decreased, as the feed sizes decreased. However, the B_y values (cumulative breakage distribution function) were changed, while the feed sizes changed; although they were expected to remain the same for all feed sizes. The breakage parameters obtained using this laboratory scale ball mill were used to simulate the product size distributions of the cement clinkers. As a result, it was seen that the simulated product size distributions were in good agreement with the experimental size distributions.

1. GİRİŞ

Öğütme prosesi endüstrinin değişik branşlarında çok önemli bir rol oynar ve çok önemli maliyet faktörlerinden birini temsil eder. Bu maliyeti azaltmak için devamlı olarak iyileştirme yapılmak düşüncesiyle çalışmalar yapılmaktadır.

Öğütmenin cevher hazırlamadaki temel operasyonlarda vazgeçilmez bir işlem olmasına ilâveten, çimento, pigment ve boya, seramik, ilaç ve yiyecek üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Cevher tenörlerindeki azalma ve kontaminasyon nedeniyle ince öğütme gerekliliği kaçınılmaz bir ihtiyaç olmaktadır ve bu da iiece ve ultra-ince öğütmeyi gerekli bir operasyon yapmaktadır

Çimentonun üretim maliyeti ve kalitesi üzerinde artan ilgi nedeniyle yoğun bir araştırma programı ilk defa 1980 yılında Laval Üniversitesi'nde başlamıştır (Gupta, 1987). Bu çalışmada 'yumuşak' ve 'sert' çimento klinkerinin farklı çalışma koşullarında bilyalı

değirmenle öğütülmesiyle 'öğütülme davranışı' için temel bilgiler elde edilmeye çalışılmıştır. Klinkerlerin öğütme davranışları, kırılma hızı ve toplam kırılma dağılım fonksiyonu parametreleri açısından çok iyi bilinen kinetik boyut-kütle balansı modeli yaklaşımıyla açıklanmıştır (Gupta, 1987; Austin, Bagga, 1981). Söz konusu model yaklaşım şöyle ifade edilmektedir:

$$i \text{ boyutunun kırılma hızı} = S_i w_i W \quad (D)$$

Burada w_i = i boyutundaki fraksiyonun ağırlıkça miktarı, S_i = i boyutunun spesifik kırılma hızı (dk^{-1}) ve W = boyut küçültme cihazına beslenen miktar. Söz konusu eşitlik analitik olarak şöyle ifade edilebilir:

$$-\frac{d[w_i(t)W]}{dt} \propto w_i(t)W \quad (2)$$

W sabit olduğu için

2.2 Öğütme Testleri

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = -S_i w_i(t) \quad (3)$$

S, zamana bağlı olarak değişmediği için

$$w_i(t) = w_i(0) \exp(-S_i t) \quad (4)$$

yani

$$\log[w_i(t)] = \log[w_i(0)] - S_i t \quad (5)$$

burada t öğütme süresidir.

Kınlı ve öğütülen malzemenin hangi alt boyut gruplarına ne kadar dağıldığı 'kümülatif kırılma dağılım fonksiyonu' ile ifade edilir. Boyut fraksiyonu j olan parçaların kırılmadan sonraki yer aldığı boyut fraksiyonundaki miktarları B_j ile gösterilir ve j malzemesinin i boyut fraksiyonuna kırılması söz konusudur. Söz konusu ifade:

$$B_{i,j} = \sum_{k=n}^j b_{i,k} \quad (6)$$

olur. B_j değerlerinin ampirik ifadesi

$$B_{i,j} = \phi_j \left(\frac{x_{j-1}}{x_j} \right)^y + (1 - \phi_j) \left(\frac{x_{j-1}}{x_j} \right)^\beta, \quad 0 \leq \phi_j \leq 1 \quad (7)$$

Burada, ϕ_j , y ve β değerleri kırılan malzemenin nasıl dağıldığını karakterize eden B fonksiyonuna ait değerlerdir; y değeri boyut dağılımındaki ince malzeme miktarının az veya çok olması ile ilgili faktördür. ϕ_j ve β değerleri ise besleme boyutuna yakın tanelerin ne kadar hızla alt boyuta geçtiğini temsil eden fonksiyon değerleridir (Austin, Bagga, 1981; Yekeler ve Ark., 1997).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Deney Malzemesi

Deneylerde; -1000+600 um, -420+250 um ve -106+75 um tek boyut fraksiyonlarına hazırlanmış çimento klinkeri beslenen malzeme olarak öğütmeye tabi tutulmuştur. Piknometreyle yapılan ölçümlerle klinkerin ortalama yoğunluğu 3 g/cm³ olarak belirlenmiştir.

Öğütme deneylerinde standart S ve B testlerinin yapılabileceği özelliklere sahip olan laboratuvar ölçekli Çizelge 1'de özellikleri verilen bir bilyalı değirmen kullanılmıştır. Öğütme kuru olarak 376 gram klinker şarjı ile yapılmıştır. Kullanılan çelik bilyalar 26 mm çapında olup, 5626 gram şarj edilmiştir.

Tek boyut fraksiyonlarına hazırlanmış klinker numuneleri değirmende kuru olarak 1, 3, 7, 20, 30 ve 40 dakika sürelerle ayrı ayrı öğütülmüş, konileme ve dörtlleme yöntemiyle elek analizi için numune alınmıştır. Elek analizi sonuçlarına göre tane boyut dağılımları ve kırılma parametreleri olan S ve B değerleri elde edilmiştir.

2.3 Simülasyon Çalışmaları

Standart S ve B testinden elde edilen tüm kırılma parametreleri (S, değerleri: özgül kırılma hızı ve B_j değerleri: toplam kırılma dağılım fonksiyonu değerleri) kullanılarak herbir besleme boyut fraksiyonlarının değişik sürelerde öğütülmesi sonucu elde edilen tane boyut dağılımlarının simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon programı, kinetik yaklaşımı kapsayan kütle-boyut modeli yaklaşımını kullanan 'Two-Stage Ball Mill Simulator' adlı Penn State University tarafından geliştirilen paket programdır (Austin ve Ark., 1989).

Çizelge 1. Klinkerin öğütülmesi için standart S ve B testlerinin yapıldığı değirmen özellikleri ve deney koşulları

Değirmen	İç çapı, mm	209
	Uzunluğu, mm	175
	Hacmi, cm ³	6003
	Kritik hız* d/dk	98.65
	Çalışma hızı, d/dk	74
Lifter	Sayısı	6
	Kesit alan	Yan-dairesel
	Yarıçapı, mm	10
Ortam (bilya)	Malzemesi	Çelik
	Çapı, mm	26
	Özgül ağırlık, s/cnr ³	7.81
	Toplam bilya ağırlığı, g	5626
	Bilya şarjı" (J)	0.20
Mineral	Çimento klinkeri	-
	Klinker şarjı*" (f.), g	376
	Özgül ağırlık, g/cm ³	3.0
	Mineral bilya oram" (U)	0.5

*Kritik hız=42.2/√N/D- d (D: Değirmen çapı, d: Bilya çapı)

$$j = \frac{(\text{Bilya ağırlığı} / \text{Bilya yoğunluğu}) \times 1.0}{(\text{Değirmen hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}$$

$$f_c = \frac{(\text{Numune ağırlığı} / \text{Numune yoğunluğu}) \times 1.0}{(\text{Değirmen hacmi})} \times \frac{1.0}{0.6}$$

$$U = \frac{f_c}{0.4J}$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Deneysel Sonuçlar

Değişik sürelerde öğütülen -1000+600 um, -420+250 um ve -106+75 um besleme fraksiyonlarına ait klinkerlerin S_i (özgül kırılma hızı) değerleri Şekil 1'de görüldüğü gibi 'birinci dereceden kırılma hipotezine' uymaktadır. Buna göre herbir fraksiyon için S_i değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Değişik besleme boyutundaki klinkerlerin S_i değerleri

Boyut, um	S _i , dk ⁻¹
-1000+600	0.62
-420+250	0.37
-106+75	0.085

Besleme tane boyu azaldıkça S_i değerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Bu ilişki ve simülasyon için ihtiyaç duyulan a-r=0.62 dk⁻¹ ve a=0.86 değerleri Şekil 2'den elde edilir. a_r değeri S_i değerinin 1 mm (1000 um) deki değeri olup, a doğrunun eğimidir.

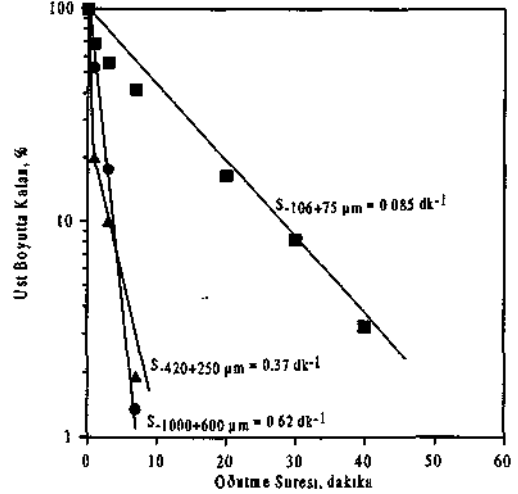
Toplam kırılma dağılım fonksiyonu (By) değerleri ise en kısa öğütme süreleri olan 1 dakika ürününün tane boyut dağılımı değerlerine Bu yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Bu yaklaşım:

$$B_{n,1} = \frac{\log\{1 - P_1(0) / (1 - P_1(t))\}}{\log\{1 - P_2(0) / (1 - P_2(t))\}} \quad (8)$$

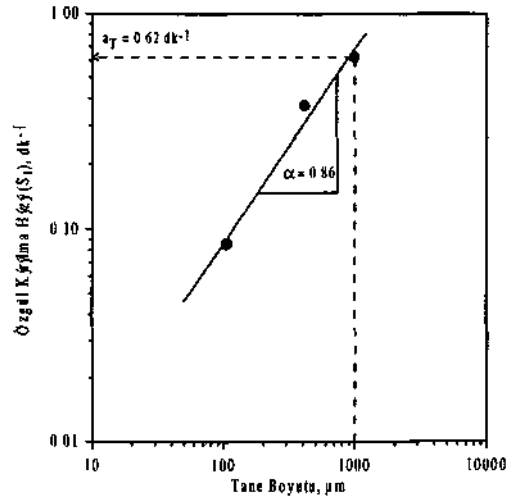
Burada Pi(t)=t zamanında i boyutundan geçen fraksiyon, P_i(0)=beslemenin i boyutundan geçen fraksiyonudur. Değişik besleme tane boyu fraksiyonlarındaki klinkerlerin (-1000+600 pm, -420+250 um ve -106+75 um) B_{i,j} değerlerinin fonksiyonel ifadelerini oluşturan ϕ, γ ve β değerleri sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Söz konusu parametre değerleri ise Çizelge 3'de görülmektedir.

Çizelge 3. Klinkerlerin B_{i,j} değerleri

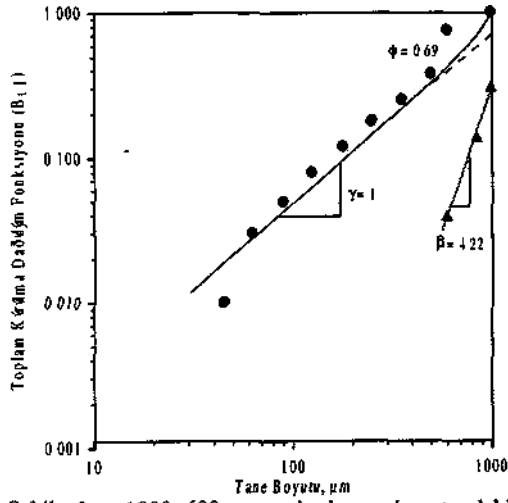
~ Besleme boyutu	-1000+600 um	-420+250 um	-106+75 um
B _{i,j} değerleri			
*	0.69	0.30	0.42
γ	1.00	1.26	1.71
β	4.22	14.46	11.97



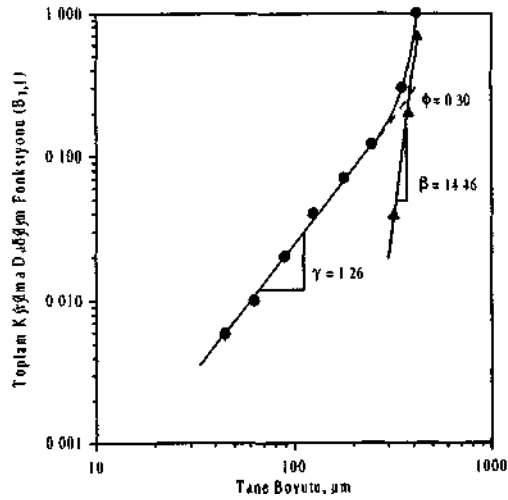
Şekil 1. Değişik besleme boyut fraksiyonlarındaki klinkerlerin S_i (özgül kırılma hızı) değeri



Şekil 2. S_i değerlerinin tane boyutu ile değeri



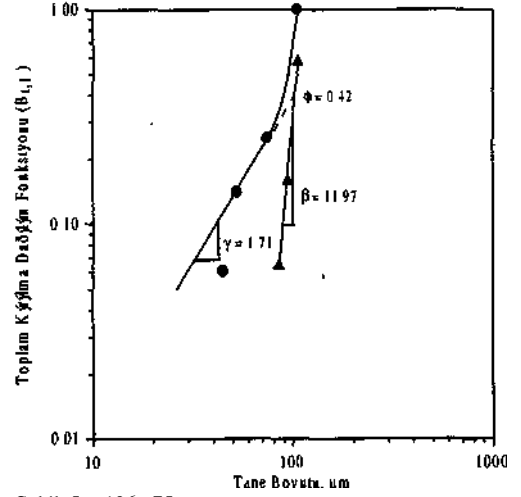
Şekil 3. -1000+600 µm besleme boyutundaki klinkerin $B_{j,j}$ değerleri



Şekil 4. -420+250 µm besleme boyutundaki klinkerin $B_{j,j}$ değerleri

Şekil 3, 4 ve 5'te görülen γ değeri doğrunun alt kısmının eğimidir, ϕ ise lineer doğrunun besleme tane boyutuna dik doğruyu kestiği nokta olup; β doğrunun üst kısmının eğimidir. Bu değerler her mineral için karakteristiktir ancak klinkerin bu çalışmada öğütülmesinde her bir beslenen tane boyutu için farklı ϕ , γ ve β değerleri bulunmuştur. Bu farklılık

Çizelge 3'te verilen γ değerlerinden açıklanabilir. Tane boyu dağılımlarının alt kısmının eğimi γ ile üst kısımları ise β ile temsil edilmektedir. Besleme tane boyu arttıkça γ değeri azalmakta; yani ince fraksiyon üretimi azalmaktadır.



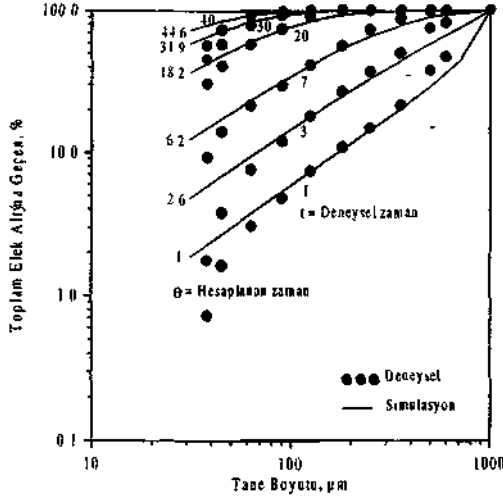
Şekil 5. -106+75 µm besleme boyutundaki klinkerin $B_{j,j}$ değerleri

3.2 Tane Boyut Dağılımları ve Simülasyonları

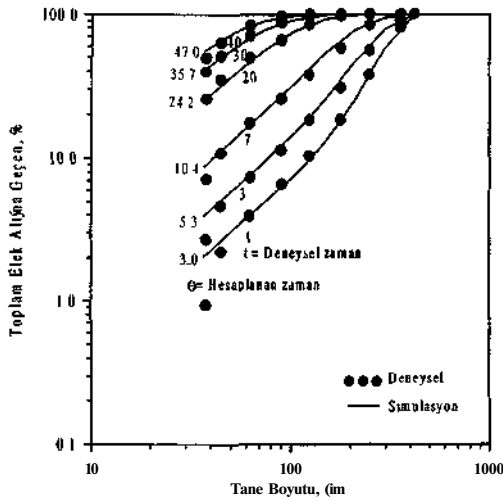
Üç ayrı besleme boyut fraksiyonuna hazırlanmış klinkerin değişik sürelerde öğütülmesiyle elde edilen boyut dağılımlarının 'Schuhmann modeli' ile sunumu, -1000+600 μm beslenen için Şekil 6, -420+250 μm için Şekil 7 ve -106+75 μm için Şekil 8'de ayrı ayrı verilmektedir. Şekil 6, 7 ve 8'de deneysel değerlerle tane boyut dağılımları verilen klinkerlerin simülasyonla elde edilen değerlerin dağılımı da aynı şekillerde herbir öğütme süresi için gösterilmiştir. Deneysel değerlerle simülasyon değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve uyumlu olduğu görülmektedir. Simülasyon için 'one point fit' yaklaşımı kullanılarak -1000+600 μm besleme için 125 μm de, -420+250 μm için 74.2 μm 'de ve -106+75 μm için 53 μm 'de yapılmış ve diğer çalışmalar ve literatürde (Austin, Bagga, 1981) görüldüğünün aksine 'hesaplanan zaman (6)', deneysel zaman (t)'den büyük bulunmuştur. Bu da klinkerin kolay kırılabilirdiğini ve ince malzemeyi problem yaratacak düzeyde üretmeyerek 'birinci

derecedan kırılma' hipotezine çok iyi uyduğunu göstermektedir. Hesaplanan zaman (θ) ile deneysel zaman (t) ilişkisi Şekil 9'da görülmektedir.

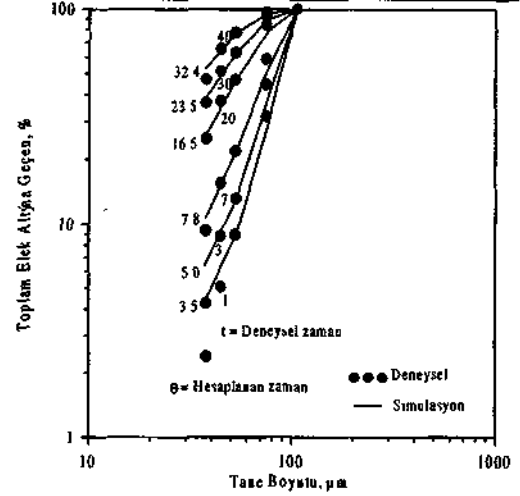
Simülasyona ait veri girişi, örnek olması nedeniyle sadece -1000+600 um besleme için Çizelge 4'de topluca verilmiştir



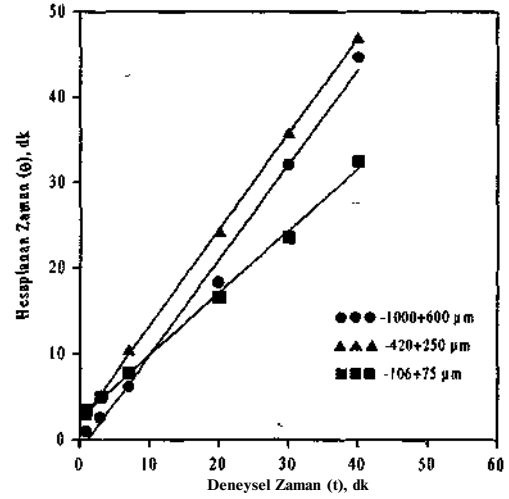
Şekil 6. -1000+600 (um besleme boyutundaki klinkerin öğütülmesiyle elde edilen tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 7. -420+250 um besleme boyutundaki klinkerin öğütülmesiyle elde edilen tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 8. -106+75 um besleme boyutundaki klinkerin öğütülmesiyle elde edilen tane boyut dağılımları ve simülasyonu



Şekil 9. Çalışılan klinker için t ile θ ilişkisi

Çizelge 4. -1000+600 um besleme için simülasyon veri girişi

Devre kod numarası				:B10
Boyut aralığı sayısı giriniz				: 11
Devreye beslenen maksimum tane boyutu (mm)				: 1
ilk değirmen için S ve B değerleri S ve B değerlerinin hesaplanmasında seçiminiz 1. Simülasyon yapılan değirmende herbir bilya boyutu için AKL (Austin, Klimpel, Luckie) parametreleri 2. Test değirmeninde aynı bilya karışımı için ortalama AKL parametreleri 3. Normalize edilen S ve B vektör değerleri				: 2
Simülasyon yapılan değirmendeki maksimum bilya çapı (mm)				:26
Ölçeklendirme sabitlerini giriniz	N_n : 1	N_s :0.5	N_t :0.2	N_f : 1
	Test	Simülasyon		
Bilya şarjı	0.2	0.2		
U değeri	0.5	0.5		
Kritik hız	0.74	0.74		
Değirmen çapı (m)	0.209	0.209		
Yaş/kuru sabiti	1			
A-Test (l/dakika.), a_r	0.62			
X_n , (mm), X_o	1			
Alfa, \sim	0.86			
Mu-test (mm), β	2			
Lambda, X	3			
Beta, β	4.22			
Gamma, γ	1			
Delta, δ	0			
Phi, ϕ	0.69			
Devreye beslenen boyut dağılımını giriniz				
Boyut aralığı no	Boyut (um)	Toplam elek altı, %		
1	1000	1		
2	707.1	0.01		
3	500	0		
Değirmen için istenilen RTD modeli seçimi				: 1
Öğütme süresi (dakika),(sırasıyla)				: 1,3,7,20,30,40
Öğütme kuru veya yaş mı (W/D)				:D
Değirmen boyunun çapına oranı				: 0.837
Öğütülen malzemenin yoğunluğu (t/m^3)				:3
Bilya yoğunluğu (t/m^3)				:7.81

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Değişik besleme boyutundaki çimento klinkerlerinin öğütme kinetiği '1. dereceden kırılma' prosesine uymaktadır. Besleme tane boyu arttıkça özgül kırılma hızlarında (S; değerleri) artmaktadır.

Toplam kırılma dağılım fonksiyonu değerleri her bir besleme boyutu için farklı olmaktadır. Çünkü ince malzemenin çokluğunu temsil eden y değeri besleme tane boyutunun artmasıyla azalmaktadır.

Klinkerlerin kırılma parametreleri daha önce çalışılan aynı besleme boyutuna yakın olan kuvars ile yakın

bir S_1 değerine sahiptir ($S_{1,kuvars} = 0.32 \text{ dk}''$ ve $S_{1, klinker} = 0.37 \text{ dk}''$). Bu da klinkerlerin kuvars gibi kırılma malzemeler grubuna girdiğini ifade etmektedir. B_j değerleri ise her malzeme için doğal olarak farklı olacağından kıyaslama gereği olmamaktadır.

Değişik sürelerde öğütme ürünü olan tane boyut dağılımlarının daha önce elde edilen kırılma parametreleri kullanılarak simülasyonları yapılmış ve deneysel değerlerle çok iyi uyum sağladığı gözlenmiştir.

Öğütmenin değişik ortam ve koşullarda yapılması çalışmanın devamı olabilir.

5. KAYNAKLAR

- Austin, L.G., Bagga, P. 1981. *Powder Technology. An Analysis of Fine Dry Grinding in Ball Mills*, 28, 83-90, The Netherlands.
- Austin, L.G., Yıldırım, K., Luckie, P.T., Cho, H.C. 1989. *Two Stage Ball Mill Circuit Simulator*, Pennsylvania State University, University Park PA, USA.
- Gupta, V.K. 1987 *A Study of the Grinding Behavior of the Cement Clinkers for Process Optimization and Control. SME-AIME Annual Meeting*, Preprint Number 87-162, Denver, Colorado, USA.
- Yekeler, M., Özkan, A., Teke, E. 1997,2 *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. Barit Mineralinin İnce Öğütülmesinin Kinetiği*, İzmir.