

Kırmada, Malzeme Özellikleri ve Kırma Mekanizmasının Etkisi; Enerjinin Kullanılması

İRFAN BAYRAKTAR*

GİRİŞ

Kırma ve öğütmenin antik çağlarda varolduğu bilinen bir gerçektir. Fakat bu uzun tarihi geçmişe ve pek bol yayına (Literature) karşın konu bütünüyle açıklığa kavuşmamıştır. Cevherler, kayaçlar, mineraller heterojen bir yapıda oldukları için, ideal malzemeler üzerine kurulu [örneğin cam) modellerden çıkarılan sonuçlar endüstriyel uygulama ile bağdaşmamıştır. Kırma olayının başarılı bir şekilde araştırılması kayaç mekaniği ile malzemeler bilimindeki gelişmelere bağlıdır.

Pekçok değışkene sahip bu olayın tam çözümlenmesi durumunda çok büyük ekonomik faydalar sağlanacaktır. Şöyle ki, 1960 larda dünyanın toplam elektrik enerjisi üretiminin %1 ni sadece çimento endüstrisi tek başına harcıyordu. Buna cevher hazırlama tesislerindeki kırma-öğütme için harcanan enerji de katılırsa işin ekonomik yönü hesap istemiyecek bir şekilde ortaya çıkar. Ve de çeşitli tahminlere göre, bu iş için kullanılan enerjinin %90-%99,9 u ist şeklinde açığa çıkmaktadır.

Kuşkusuz sorun, sadece makineye giren enerj ile öğütme mekanizmasına bağlı olduğu kadar malzemenin fiziksel özellikleri ile de yakından ilgilidir. Bu durumda konuyu hem malzeme Özellikleri¹ açısından ve hem de kırma-öğütme tipi açısından incelemek gerekir.

Kırma ve öğütme olayı olasılıklar problemidir, çünkü pekçok faktörler tarafından sarılmıştır; Tane boyutları, tane şekilleri, çatlakların oluşumundan önce ve sonraki kırılma dayanımları, mikro çatlakların uzunluğu, uygulanan gerilimin yönü ve büyüklüğü, kırma ya da öğütme makinesinin iç dinamiği gibi. Bütün bunların sonucu olarak öğütme modellerinin sistemleri istatistiksel olma zorunludur.

KIRILACAK MALZEME ÖZELLİKLERİNE VE KIRMA MEKANİZMASINA İLİŞKİN OLARAK KIRMANIN İNCELENMESİ :

Bir kırma teorisinin oluşumunu tki noktadan ele almak gerekir. Birinci noktada kırılacak katının fiziksel özellikleri, ikinci noktada kırmayı oluşturacak mekanik koşullar.

Tanaka 1966 da, kırmada tane boyu ve enerji girdisi arasındaki ilişkiye yeni bir açıdan yaklaştı ve üç kırılma olasılığı ileri sürdü. Birincisi, kırılmanın oluşabilmesi için tane üzerine dış gerilimlerin uygulanması gerekir. İkinci olasılık kırılma ayanımı ile ilgilidir. Uygulanan dış gerilim tanenin kırılma dayanımının aşmıyorsa kırılma oluşmaz. Üçüncüsü, bir katı içinde kırık büyümesi ile ilgilidir. Bu üç olasılıktan türeyen denklem:

$$\hat{S}_5 \pm L \xi$$

(D)

* Maden Yüksek Mühendisi
Hacettepe Üniversitesi - ANKARA

Burada, P, tüni kırılma olasılığını ifade eder ki bu da tanenin çarpma olasılığı ile belirlenir, Pc. Kırılma dayanımına ilişkin olasılık P\$ ve kırık büyümesine ilişkin olasılık Pa dir. Denklem 1 daha önceki kırılma denklemleri ile karşılaştırılırsa;

$$\frac{dS}{dE} = k_p X^n \quad (2)$$

1. denklemde tüm kırılma olasılıklarından sözedildiği halde 2. denklemde bu olasılıklar yoktur. Denklemlerdeki N ve n ler birbirlerinden farklı değerlerde olup, kırılma koşulları ile belirlenirler. Bu iki denklemden çıkan sonuca göre, önceki kırılma denklemlerinin noksanlığı, kırılma olasılığının hesaba katılmamasıdır.

Kırmada Olasılıklar :

Bir kırma olayında bazı taneler dış gerilimlere dayanırlar fakat bunun dışındakiler dayanamaz, kırılırlar. Dış gerilime dayanan tanelerin yalnızca çatlayabiime şansı vardır. Bu olasılık genellikle, tane boyuna ve bazı mekanik koşullara bağlıdır. Dayanma ya da kırılma, tanenin kırılma dayanımına ilişkin bir olasılık içerisinde tartışılır. Uygulanan gerilimin, madde içinde oluşturduğu maksimum gerilim $\sigma_{max} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2}$, ve maddenin kırılma dayanımı $\sigma_c = \frac{G}{A} = \frac{G}{\pi r^2}$ ise kırılma σ_c yi aşması halinde oluşur. Bu yargının matematik ifadesi:

$$P_f = \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}}\right)^m \quad (3)$$

nı burada sabittir.

Rumf'a göre (1959), bir ani darbe ile (impact) bir katı içerisinde maksimum gerilimin oluşumu şöyle belirleniyor:

$$\sigma_{max} = C \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}\right)^{1/5} \cdot v^{2/5} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)^{3/5} \cdot \left(\frac{1-v_1^2}{\gamma_1} + \frac{1-v_2^2}{\gamma_2}\right)^{-4/5} \quad (4)$$

Burada m_1 ve m_2 iki cismin kütleleri, r_1 ve r_2 darbe noktasındaki eğrilik yarıçapları, γ_1 ve γ_2 elastik modülleri, ve Polsson oranlarıdır. Aynı cisimden iki eş kütle kabul edilirse, denklem (4) şu hale girer:

$$\sigma_{max} = C_1 \cdot m_1^{1/5} \cdot v^{2/5} \cdot r^{-3/5} \cdot \gamma_1^{4/5} \quad \text{olur.}$$

Kütle, özgül ağırlık ve boyut arasındaki ilişki kurulursa

$$\begin{aligned} m &= V \cdot \rho \\ V &= X^3 \\ m &= X^3 \rho \\ \sigma_{max} &= C_2 \cdot X^{3/5} \cdot \rho^{1/5} \cdot V^{2/5} \cdot r^{-3/5} \cdot \gamma_1^{4/5} \end{aligned} \quad (5)$$

Diğer taraftan, bir malzemenin kırılma dayanımı (σ_c) Giriffith (1921) tarafından şu denklemle belirleniyor:

$$\sigma_c = \frac{C_3 \cdot \gamma_1^{3/2} \cdot E^{1/2}}{C_2 \cdot \gamma_1^{3/2} \cdot \rho^{1/2} \cdot r^{-3/2} \cdot X^{3/2} \cdot \gamma_1^{4/2}} \quad (6)$$

Buradaki kırılma yüzeylerinin özgül yüzey enerjisidir ve C_r kırık derinliğidir.

Özgül yüzey enerjisinin ölçümlerinden farklı sonuçlar çıkmaktadır. Bu nedenle, σ_c nin en uygun değerini kullanmak gerekirse, dolaysız olarak, kırma deneylerinin değerlerini almalıdır. Bu da Pifret tarafından (1949) basit bir kırma deneyi (Cismin kendi ağırlığı ile düşerek kırılması) ile ortaya konmuştur. Kırılma dayanımının, (Birim yeni yüzey üretimi için gerekli kırma enerjisi, Mohs sertliği (H) ve yoğunluğun karekökü ile dolaysız orantılı olduğu görülür. Gerçi kırma için giren enerjinin hepsi yeni yüzeylerin oluşumuna harcanmaz fakat ısı, ses, v.b. ne dönüşür. Ve kırma için gerekli enerjinin yaratılan yeni yüzeylerle orantılı olduğu Piret için son derece duyarlı deneylerinde görülür. Bu nedenle kırılma direncinin özgül yüzey enerjisi ile

orantılı olduğu söylenebilir. Eğer bu kabuller mantıklı ise pekçok kırılğan malzeme için

$$\sigma_s = C_5 \sqrt{\gamma \cdot H \cdot f_p^{0.5}}$$

ilişkisi yazılır. (7)

Mohs sertliği (H) pekçok metal için elastisite modülünün karekökü ile orantılıdır.

Bu ilişki dolaysız olarak kırılğan bir katıya uygulanırsa, 7. denklem .

$$\sigma_s = C_5 \sqrt{\gamma \cdot \gamma_1^{0.5} \cdot f_p^{0.5}} = C_5 \cdot \gamma^{0.75} \cdot f_p^{0.25} \quad (8)$$

Denklem (5) ve (8) den

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} \approx \left(\frac{C_5}{C_2}\right) \cdot \left(\frac{f_p}{\gamma}\right)^{0.25} \cdot \frac{1}{\gamma^{0.4} \cdot X^{0.6} \cdot \sqrt{0.4}} \quad (9)$$

Pekçok kırılğan malzeme için aslında tane şekli veya eğrilik yarıçapı aynı kabul edilir. Ayrıca denklem 9 daki yoğunluk ve elastisite modülü arasındaki ilişki yazılırsa :

$$\gamma = 0.9 (f_p - 2.1) \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

için bir sayısal değer bulunur. Bu durumda denklem kabaca malzeme özelliklerine bağımlılıktan kurtulur.

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} = C_5 \cdot \frac{1}{X^{3/5} \cdot \sqrt{2/5}} \quad (10)$$

Sonuçta P_o tane boyuna ve çarpma levhasına çarpış hızına (Impact hızı) bağlı olur. C_5 sabiti deneysel verilerden elde edilir. Örneğin kalsit üzerine yapılan deneylerde C_5 1,8 olarak bulunmuştur. Buradan P_{ff} :

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{\gamma(\gamma + B)}{C_r}} \quad \text{olur. (11)}$$

Denklem 1 deki P nin üç elemanı P_c P_a yine denklem 1 de yerien konursa (Yalnız P_a aynı koşullar altında pekçok malzeme için aynı kabul edildiğinden, P yerine P_c ve P konulur.)

$$\Delta S = \frac{k_1 \cdot P_c \cdot \left(1 - \frac{1.8}{X^{3/5} \cdot \sqrt{2/5}}\right)^m}{X^N} \quad (12)$$

Yani özgül yüzey artışı (cm^2/g), tane boyu ile ters, çarpma ve gerilim olasılığı ile doğru orantılıdır.

Bütün bunlara karşı, pekçok malzeme biraz plastik özellik gösterir. Bu nedenle kırık ilerlemesi için giren enerji, sadece yüzey büyümesi için değil bir kısmı da plastik deformasyona harcanır. Bu durumda Griffith'in denkleminde plastik işi (P_L) katmak gerekir.

$$P_c = \left(1 - \frac{1.8}{X^{3/5} \cdot \sqrt{2/5}}\right)^m \quad (13)$$

Burada P_L , kırık ilerlemesi anındaki oluşan plastik işi tamamlar. P_L değerinin kırık ilerleme hızı ile ilişkili olduğu bilinir ve çok hızlı kırık ilerlemelerinde P değeri azalır. Kırık ilerleme hızı. Ve, Gltman (1956) tarafından şu denklemle verilir:

$$V_c = B \cdot V_o \left(1 - \frac{\gamma}{H_e}\right)^{1/2} \quad (14)$$

V_o ses hızı, HE elastik enerji ve B de bir sabittir. Denklem (14) e göre aynı malzeme için bile V_e , HE ile değişik ki bu da maksimum gerilime (σ_{mix}) bağlıdır.

Bu verilere göre malzeme biraz plastik özelliğe sahip olduğu zaman yüzey artışı için kullanılan enerjinin oranı tamamen sabit olamaz; değişir. Bu nedenle nın etkisi kırma mekanizmasına bağlı olduğu kadar malzeme özelliklerine de bağlıdır. P_L de malzeme özellikleri kadar kırmanın mekanizmasına bağlı olduğundan, P_L için malzeme özelliklerine bağlı bir sabit tanımlanırsa

$$P_r = \left(1 - c_g \frac{\sqrt{\frac{Y \cdot r}{c_r}}}{c_{max}}\right)^m$$

yazılır.(15)

Bu durumda plastik iş ihmal edilmiş olur fakat genellikle kırılğan katılar için denklem 11 başarılı bir yaklaşımı (P d için) verir.

ENERJİNİN KULLANILMASI :

Kırma - Öğütme olayında enerji dengesini oluşturan çeşitli değişken yazılması, niteliksel değerlerinin belirtilmesi olanaklıdır. Kırmayı oluşturması için makine giren toplam enerji. Eg (the gross energy input Eg)2 ana gurupta incelenebilir:

1. Değirmenin çalışması için gerekli kinetik enerji öğütmeyi oluşturmaz. Bu enerji yatak sürtünmeleri ve diğer iletim kayıpları olarak hesaplanır, kırma öğütmeye yardımcı olmaz. Bir kısım enerjide değirmen içindeki malzemenin taşınması için harcanacaktır. Bunların ölçüm ve izolasyonları kolay olmasa bile belirli bir miktar enerji harcadıkları bilinir.

2. Arta kalan enerji - ki bu net enerji olarak adlandırılır - aslında toplam enerji ile orantılıdır. Kırma öğütmeden sorumlu olan enerji net enerjidir.

Öğütme ile sorumlu olan net enerjiyi de gruplandırmak olanaklıdır. Net enerjinin üç parçadan oluştuğunu söyleyebiliriz: 1. Büyük bir kısmı öğütme ortamı tarafından harcanır, 2. Bir kısım şarjın kinetik ve potansiyel enerjisini oluşturmakla sorumludur, 3. Net enerjiden artan kısım gerilimleri oluşturması istenirken, artan enerji (Ec) birim deformasyon enerjisi, plastik deformasyon iç ve dış yüzey enerjileri, sürtünmelerden doğan ısı (taneler arası sürtünme) için yine büyük bir kısmı harcanır. Gerilimleri oluşturacak kısım Ec nin bir parçasıdır, (ki bu Es ile belirlenir).

Burada bilinmiyen ilişki Es ile Eg arasında ki ilişkidir. Gerçekte Es bir öğütme

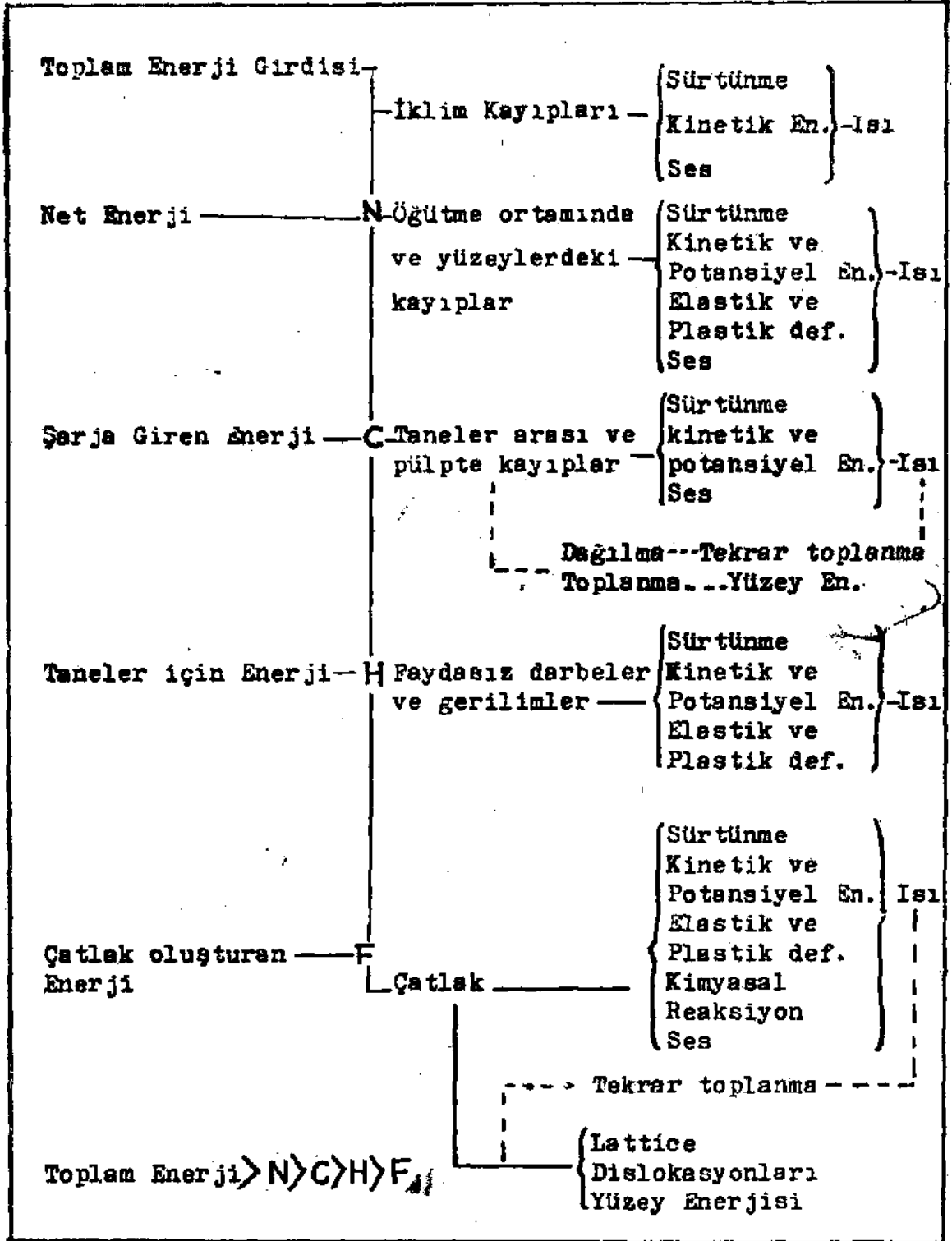
sisteminde gerilimleri oluştururken, bu gerilimin bir kütleyi oluşturan iç kısımdaki tanelere zincirleme bir iletişimle geçerek etkisizleştirdiğini ve pulpun yarı akışkan (viskoz) olması nedeniyle kırılmaya harcanacak enerji oranını azalttığını belirtmek gerekir.

Öğütme için değişimene gren enerjinin dağılımı şematik olarak şöyle gösterilebilir : (Şekil. 1.).

SONUÇLANDIRMA

Malzeme özellikleri, mekanik koşullardan giderek kırılma olayı, ve enerjinin bu olaydaki rolü ana hatları ile ortaya konulmaya çalışıldı. Kolayca görülüyor ki istediğimiz iş {bir tanenin belli bir boyuta kırılması} çok fazla enerji harcanmasına neden oluyor. Elimizdeki saptanan değişkenlere, enerjinin harcanma yerlerine göre ancak şarja giren enerji dışındaki yollarda değişiklik yapma olanağı vardır. Bu da büyük ölçüde iletim kayıpları ile öğütme ortamının harcadığı enerjidir. Öğütme ortamının harcadığı enerjiyi sıfır yapabiliriz, (Otojen öğütme) Fakat iletim kayıpları bugün bilinenler içinde (dişli iletim, wrap-around motor) daima olacaktır. Yani bildiğimiz, eskiden beri kullanılan kırma-öğütme makineleri bize doyurucu bir enerji tasarrufu sağlayacak değişimi yapma olanağını vermiyor. Bu durumda yeni sistemlere gereksinme duyuluyor.

Bir kayacın sıkıştırıcı gerilimlere karşı yenilme direncinin çekilme gerilimlerine karşı yenileme direncinden çok daha büyük olduğu bilinen bir gerçek. Örneğin, granit için sıkışma dayanımı 1000-2500 kg/crrf iken çekme dayanımı 70-250 kg/cm² dir. Şimdiye değin bildiğimiz kırma-öğütme sistemlerinin hiçbiri çekilme dayanımından faydalanmamakta. Son zamanlarda «snyder» adı verilen proses bu özellikten yararlanarak kırmayı oluşturma yolunda. Kırılması istenen cevher bir oda içerisinde çok yüksek buhar basıncı ile sıkıştırılıyor. Bir çıkış kapağının aniden açılması ile buhar basıncı altındaki cev-



(Harris, 1965 den)

Şekil. 1

her ses hızına yakın bir hızla buradan fırlıyor ve bir çarpma levhasına çarpıyor. Ani basınç kalması madde üzerinde bir çekilme gerilimi oluşturuyor ve bu gerilim çarpma ile desteklenerek kırılma oluşturuyor. Laboratuvar ve pilot çalışmalarının sonucuna göre cevher hazırlama açısından ideal bir kırma. Çünkü cevher tane sınırlarından ayrılıyor yani ideal bir serbestleşirle oluşuyor.

Bunca yıldır beklenene acaba çözüm getirecek mi?

SEMBOL VE TANIMLAR

- B = Sabit
C = Sabit
 C_1, C_2 = Sabitler
 C_r = Kırık derinliği, cm.-
 E_c = Şarjın birim hacminde gerilim oluşturan enerji
 E_g = Toplam enerji girdisi
• H = Mohs sertliği, boyutsuz
; H_e = Elastik enerji gr-cm/cm'
. K_1, K_2 - Sabitler
: m = Sabit
 m_1, m_2 = Kütleler, gm.
N = Sabit
n = Sabit
P = Kırılma olasılığı, boyutsuz
 P_a = Çatlak ilerleme olasılığı, boyutsuz
 P_c = Çarpışma olasılığı, boyutsuz
 P_L = Çatlak ilerlemesindeki plastik iş gm-cm/cm^a
P = Gerilim olasılığı ve malzemenin yapısı, boyutsuz ,
 r_1, r_2 = Eğrilik yarıçapı (darbe noktasında), cm .
S = Tanelerin özgül yüzeyi cmVgm.
AS = Özgül yüzey artışı cmVgm.
V = Tane hızı (darbede) cm/sn.
 V_c = Kırık hızı, cm/sn
 V_s = Ses hızı, cm/sn

V = Hacim, cm³

X = Tane boyu, cm

Y_1, Y_2 = Elastisite modülleri, gm/cm³

δ = Özgül yüzey enerjisi gm-cm/cm²

ν_1, ν_2 = Poisson oranları, boyutsuz

(ρ_p) = Tanenin özgül ağırlığı gm/cm³

σ_{ffa} = Tanenin kırılma dayanımı ğm/cm²

$\sigma_{m,x}$ = Tane içinde oluşan maksimum gerilim gm/cm*

KAYNAKLAR

- 1 SUZUKI, A. and TANAKA, T., «Crushing Efficiency in Relation to some Operational Variables and Material Constants» I and EC Process Desigu and Development, Vo. 7, Page 161, April 1968.
2. HARRIS, C.C., «A Study of Comminution; a modified logistic growth function as a model of fine grinding» cement and Gravel, Vol. 38, May 1963.
3. HARRIS, C.C., «Theory of Mineral Separation Processes on the Role of Energy in Comminution» Columbia Univ., Henry Krumb School of Mines yayınlarından, July 1965
4. FARMER, W.I., «Engineering Properties of Rocks.» E. and F. N. Spon Ltd, London, 1968.
5. HARRIS, C.C., «Monte Carlo Model of a Fracture process» Nature, Vol. 209, p 1302-3, March 1966.
6. HELLYER, C.W., «Crushing And Grinding» Mining Engineering, Feb., 1974.