

Öğütme Enerjisi Kuramları ve Razi Deneysel Bulguların Bu Kuramlara Uygunluğu

Grinding Energy Laws and Applicability of These To Some Experimental Findings

Muammer ÖNER (*)
Mehmet CAN (**)
Ökkeş ÇAMDALI (**)

Ö Z E T

Öğütme enerjisi konusuna ilişkin yazınım derlenerek, en çok uygulama **bulmuş** Rittinger, Kick, Bond ve Charles enerji yasalarına **alt** kuramsal bilgiler verilmiştir. Kuvarsın, laboratuvar çaplı bilyalı değirmende ince öğütülmesine ilişkin deneysel bulgular ve endüstriyel çaplı bilyah değirmende fosfat kayasının ince öğütülmesine ilişkin sonuçların adı geçen yasalara uygunluğu araştırılmıştır. Değerlendirmeler Charles ve Rittinger yasalarının ince öğütmeden daha geçerli olduklarını göstermiştir.

ABSTRACT

A survey has been made of the literature on energy requirements in comminution and four theories, namely, Rittinger, Kick, Bond and Charles have been reviewed. Applicability of the above mentioned laws to the laboratory findings on quartz grinding in a ball mill, and to grinding of phosphate in an industrial scale ball mill indicated that Charles and Rittinger laws have more validity in fine grinding.

(*) Dr. Maden Yük. Müh., H.Ü. Maden Müh. Bölümü, ANKARA.

(**) Maden Mühendisi.

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek tenörlü maden yataklarının hemen hemen tümüyle tüketilmiş olması gelişen teknolojinin gereksinimlerini karşılayabilmek için düşük tenörlü - büyük rezervli yatakların İşletilmesini zorunlu kılmıştır. Bu zorunluluk tane serbestleşmeslne bağlı olarak ufalamanın bir birim İşlemi olan öğütmenin önemini de arttırmışta Öğütme işlemini izleyen cevher hazırlama yöntemlerinin başarısı ile bir tesisin verimi öğütmenin başarısı ile koşuttur. Ufalama (kırma - öğütme) işleminin tasarımı, uygulaması ya da uygulama sırasında karşılaşılan sorunların çözümü çoğunlukla önceki deneyimlere dayanılarak yapılmaktadır. Bunun nedeni ise tutarlı bir ufalama kuramının geliştirilememiş olmasıdır, Sözü edilen ufalama kuramının şu sorunlara matematiksel yanıtlar getirmesi gerekmektedir :

1. Kırma-öğütme işlemi sonucu elde edilecek ürünün boyut dağılımı,
2. Bu dağılımlı bir girdi malzemesini elde etmek için gerekli enerji miktarı ile,
3. Bu İşlemin sürdürüldüğü düzenekteki hız, bir başka deyişle ufalama kinetiğidir (Utine. 1975).

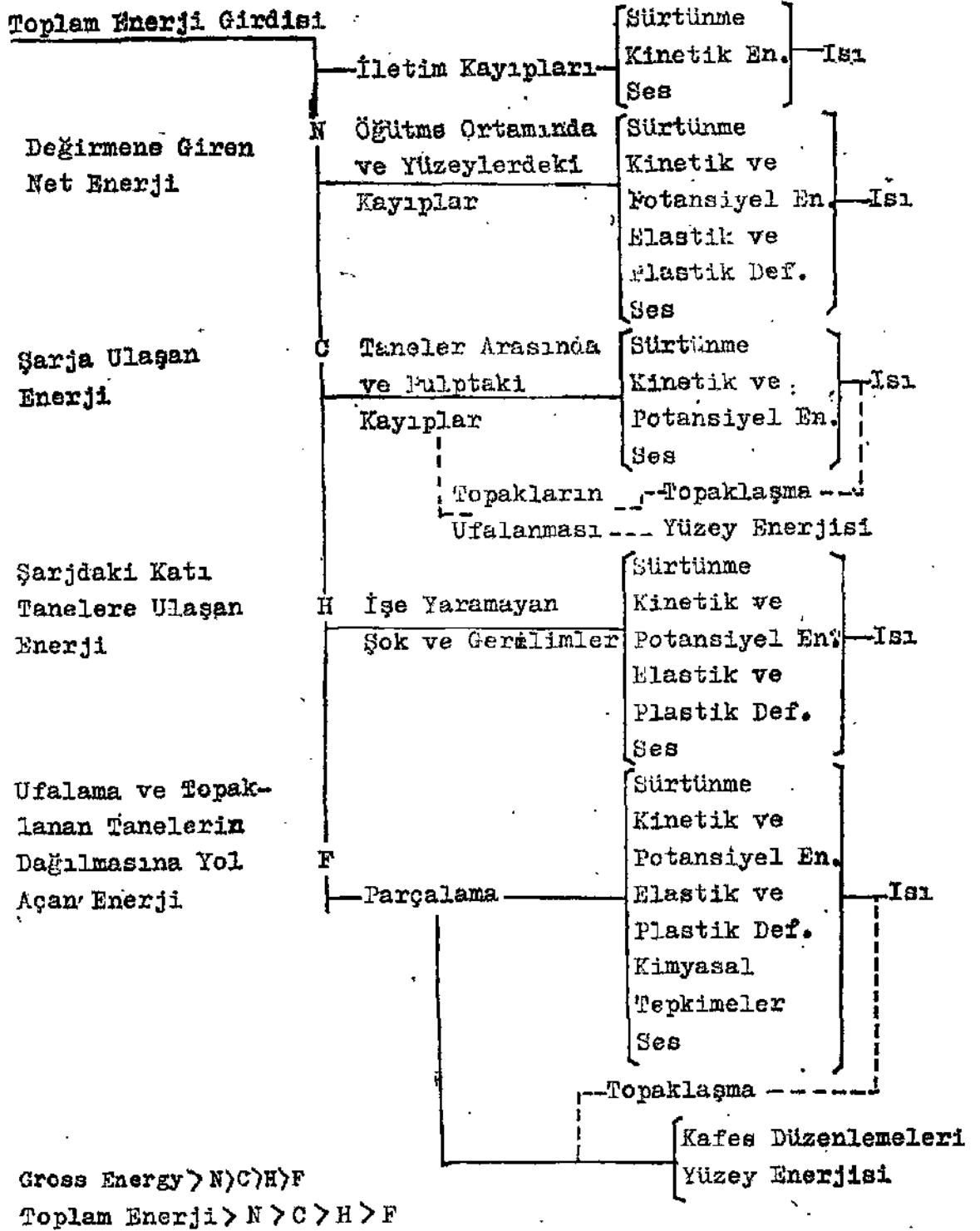
Öğütme İşlemi Ne ilgili en önemli sorun kuşkusuz öğütmede tüketilen enerjidir. Bu konu 1867'den bu yana araştırmacıları yakından ilgilendirmiş, konuya ilişkin birçok araştırma yapılmıştır. Ancak ufalama İşleminin sayısız değişken içermesi ile malzemeyi konu alan bilimlerdeki gelişmelerin yetersizliği tutarlı bir kuramın gelişmesini engellemiştir. Ortaya atılan kuramlar ufalama enerjisini yalnızca bir yada birkaç değişkeni gözönüne alarak belirlemeye çalışmışlar, birçok değişkeni gözardı etmişlerdir- Kuşkusuz malzeme ile ilgili bilimlerdeki gelişmeler bu sorunun çözümüne yardımcı olacaktır.

Günümüzde üretilen enerjinin %5f ufalamada harcanmaktadır (Rumpf, 1962). Danada önemlisi ufalama sistemine iletilen enerjinin yalnızca %1'i yeni yüzey

oluşturmakta kullanılmakta, geriye kalan %99 luk kesim ise İletim kayıpları, sürtünme, ses gibi başka enerjiler biçiminde tüketilmektedir (Şekil 1). Ufalamada Önemli yer tutan öğütme ortamının tükettiği enerji, otojen öğütme uygulaması ile ortadan kaldırılabilir, ancak, iletim kayıpları bilinen iletim sistemleri için her zaman olacaktır. Bir başka deyişle, kullandığımız ufalama makineleri doyurucu bir enerji arttırımı sağlayacak değişim yapma olanağını vermemektedir. Kuşkusuz bu konu ile ilgili yapılmış çalışmalar vardır. Örneğin «Snyder» adı verilen bir işlem malzeme çekilme dayanımından yararlanarak kırma yoluna gitmektedir. Bilindiği gibi bir kayacın çekilme dayanımı, sıkışma ve makaslama gibi öteki gerilimlere karşı olan dayanımından daha küçüktür ve sonuçta ufalama için daha az enerji gerekecektir. Ancak, iyi bir serbestleşme sağlanmasına karşın, bu işlemin beklenen çözümü getireceği bilinmemektedir (Bayraktar, 1975).

Görüldüğü gibi ufalama (kırma - öğütme) işlemindeki belirsizlikleri giderecek her olumlu katkı büyük ekonomik yararlar getirecektir. Herhangi bir ufalama devresi tasarımında enerji gereksiniminin ne kadar olacağı önceden yaklaşık bir doğrulukla saptanabilmelidir. Bunun gerçekleştirilmesi ise kuramsal çalışmalardaki tutarlılığa bağlıdır. Kuşkusuz bu konudaki çalışmalar yalnızca sisteme verilmesi gerekli enerjiyi belirlemekle kalmamalı, bu enerjiyi en aza İndirecek çalışmalar da yoğunlaştırılmalıdır. Örneğin son yıllarda, öğütme sistemlerine yüzey eylemleri maddelerin eklenmesi ile tanelerin yüzey özelliklerini değiştirerek - yüzey enerjilerini düşürerek Öğütme etkinliğinin arttırılması fazla ilgi gören araştırma konularından biridir (Öner. 1981).

Bu çalışmada yalnızca öğütme enerjisini belirlemeye yönelik enerji kuramları ele alınacak, bazı laboratuvar bulguları bu kuramlar ışığında değerlendirilecektir.



Şekil 1. Dönel bir değirmende enerjinin kullanılması modeli (Harris 1965).

2. ÖĞÜTME ENERJİSİ KURAMLARI

2.1. Rittinger Kuramı

Ufalama işleminde enerji girdisi ile oluşturulan tane boyları arasındaki ilişki ilk kez 1867'de Rittinger tarafından ortaya atılmıştır. Rittinger'e göre bir ufalama işleminde gereksinilen enerji oluşturulan yeni yüzey ile doğru orantılı, buna bağlı olarak tane boyu ile ters orantılıdır :

$$E_r = C_r (A_O - A_B) \quad (H)$$

Bu bağıntıda;

E_r : Enerji girdisi (kwh/ton)

C_r : Rittinger sabiti

A_o : Ürünün özgül yüzey alanı (cm^2/cm^3)

A_B : Beslemenin özgül yüzey alanı (cm^2/cm^3)

Birim hacim başına yüzey alanı $XVX^3 = 1/X$ olduğundan bağıntı (1)

$$E_r = C_r (1/X_U - 1/X_B) \quad (2)$$

olarak düzenlenebilir. Burada;

X_U : Ürün boyutu

X_B : Besleme malzemesinin boyutudur.

Rittinger yasasının kuramsal temeli ufalamada gerekli enerjinin yalnızca yeni yüzey oluşturmakta tüketildiği varsayımdır. Ancak birçok boyut indirgeme işleminde yeni yüzey oluşturmak için kullanılan enerjinin, tüketilen toplam miktarın çok küçük bir kısmı olduğunu gösteren önemli kanıtlar vardır. Bu konuya ilişkin temel düşünce, sisteme verilen enerjinin çok büyük kısmının kinetik enerji, tane-tane sürtünmesi, tane-astar sürtünmesi, plastik deformasyon, ses gibi başka enerjiler biçiminde tüketildiğidir.

Rittinger yasasının geçerli olduğu boyut aralıklarına ilişkin değişik görüşler öne sürülmektedir- Dobie, bu yasanın ince taneler için geçerli olduğunu söylemesine karşın, Walker, Shaw ve Charles 1 mikrondan daha kaba boyutlarda geçerli olduğunu belirtmişlerdir (Hukki, 1962). Hukki'nin Enerji Tüketim Çizelgesi {Çizelge 1}

Çizelge 1. Enerji Tüketimi Çizelgesi (Hukki, 1962)

	ENERJİ TÜKETİMİ (KWH/TON)							
Rittinger'e Göre	0.0009	0.009	0.09	0.9	9	90	900	
Kick'e Göre	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Bond'a Göre	0.07	0.22	0.69	2.18	6.91	21.8	69.1	
Pratik Tüketim		0.35	0.6	1.6	10			
	10 m	1 m	100 mm	10 mm	1 mm	100 µ	10µ	1 µ

Tm-100mm : Birincil Kırma

100 mm - 10 mm : İkincil Kırma

10 mm - 1 mm : Kaba Öğütme

1 mm -100 µ : İnce Öğütme

incelendiğinde sorun daha açık biçimde anlaşılacaktır: 100 mikrondan 10 mikrona yapılacak bir boyut indirgeme işlemi için Bond kuramından bulunan 21.8 kwh/ton enerji değeri uygulamadaki gereksinimi karşılamak için yetersizdir. Örneğin, %92'i - 325 meş (44 mikron) incelikte çimento öğütülmesinde yaklaşık 35 kwh/ton enerji gerekmektedir. 44 mikronluk ürün 10 mikrondan çok daha kaba olduğundan Rittinger'e ilişkin 90 kwh/ton enerji değeri daha tutarlıdır. 10 mikrondan 1 mikrona yapılan boyut indirmedeki enerji değerleri incelendiğinde, Rittinger değerinin tutarlı, Bond değerinin tartışılabilir, Kick yasasından bulunan değer ise olanaksız olduğu görülecektir (Hukki 1962). Rittinger yasasının geçerliliğini Gross ve Zimmerley kuvars, Dean manyetit, Pfiere ve Schellinger bir grup mineral üzerinde yaptıkları çalışmalarla göstermişlerdir (Hukki, 1962).

2.2. Kick Kuramı

1885'de, sıkıştırılmış küplerin gerilim - birim deformasyon eğrilerinden yola çıkarak. Kick, katıların ancak elastik sınırlarının ötesinde yüklenmekle kırılabileceğini öne sürmüştür. Kick kuramı «geometrik şekilleri benzer, ancak değişik boyutlardaki katıları aynı oranlarda ufalamak için gerekli olan enerjiler eşittir» biçiminde açıklanabilir (Charles, 1957). Ufalamada kullanılan enerji Rittinger'de olduğu gibi oluşturulan yeni yüzey alanı ile değil, tanelerin hacimleri ya da ağırlıkları ile orantılıdır (Taggart, 1914). Kick kuramı aşağıdaki bağıntı ile verilebilir :

$$E_k = C_k \log_{10} (X_b/X_u) \quad (3)$$

Bu bağıntıda;

E_k : Enerji girdisi (kwh/ton)

C_k : Kick sabiti

X_b : Besleme malzemesinin boyutu

X_u : Ürün boyutudur.

Bağıntı - 3'deki X_b/X_u indirgeme oranını (Rr) verir ve Kick'e göre bir malzemeyi değişik boylara indirmek için gerekli

enerji $\log R_r/\log 2$ ile orantılıdır (Bond, 1952).

Tutarlı bir temelden çıkmasına karşın uygulamada çok az kullanılan Kick yasasının geçerli olduğu boyut aralıklarına ilişkin değişik görüşler vardır. Dobie, Kick yasasının iri tane boylarında daha doğru sonuçlar verdiğini, buna karşılık Walker, Shaw ve Charles 1 "mikrondan daha ince boyutlarda geçerli olduğunu öne sürmüşlerdir- (Charles, 1957; Hukki, 1962). Hukki'ye göre ise (Çizelge 1) İri tane boylarında ufalamada Rittinger yasası geçersiz, Bond yasası tartışılabilir. Kick yasası ise çok daha tutarlıdır (Hukki, 1962).

Taggart, Kick kuramına ilişkin bir çalışmada (Taggart 1914) bu yasanın kuramsal çıkarımını sıkıştırılmış küplerin gerilim - birim deformasyon eğrilerine dayandırmıştır. Kırmak işleminde yapılan işin kınlan tanelerin hacimleri ile orantılı olduğunu ve Kick yasasının elastik sınırlar içerisinde şekil değiştiren tüm maddeler için geçerli olduğunu söylemesine karşın hiçbir deneysel konit vermemiştir.

Gerçekte ufalama alanında Kick kuramına ilişkin deneysel veriler oldukça yetersizdir. Ancak makina mühendisliğinde kesme, sıkıştırma gibi işlemlerde kullanım yeri vardır (Hukki, 1962).

2.3. Bond Kuramı

Rittinger ve Kick kuramlarının uygulamada karşılaşılan enerji sorunlarına yeterli yanıtlar getirmemesinden ötürü bu konudaki kuramsal çalışmalar sürdürülmüştür. İki yasanın dayandığı temelleri yeniden inceleyen Bond, bu iki yasa arasında bulunacak bir enerji-boyut indirgeme ilişkisinin daha geçerli olabileceğini öne sürmüş ve Üçüncü Kuram olarak da bilinen ilişkiyi geliştirmiştir.

X çapındaki bir küpü kırmak için gerekli enerji, Rittinger'e göre X^2 , Kick'e göre ise X^3 ile orantılıdır. Birim hacim başına ortalama birim deformasyon enerjisi yoğunluğunda tane hacmi, X^3 ile orantılı olacaktır.

tır. Kritik birim deformasyonların üzerinde oluşan yerel deformasyonlar çoğunlukla X^* ile orantılı olan tane yüzeyinde çatlak oluşumuyla sonuçlanır. Düzensiz şekilli taneler kırıldığında, birim deformasyon enerjisi tane yüzeyine eşit olarak dağılmaz; ilk çatlak oluşur ve sözkonusu enerji çatlakla akar, taneyi çatlatır, kırılmaya neden olur. Yeni çatlakların oluşumuyla bir «kırılma düzeni» ortaya çıkar. Kırılmada yüzey ve hacim etmenlerinin ikisi de etkilidir. Bu etkiler eşit olduğunda kırma için gerekli enerji $p(*.X)^*$ ile orantılı olacaktır. X^*P değeri Rittinger ve Kick varsayımlarının ortasında yer almaktadır.

Birim hacimdeki benzer şekilli tanelerin sayısı $1/X^3$ ile orantılı olacağından, birim ağırlık yada birim hacimdeki malzemeyi kırmak için gerekli enerji XWX^3 ya da $1/X^{**}$ Me orantılıdır. Bu sonuç Bond kuramının temelidir.

Bond kuramı «belirli ağırlıktaki homojen bir malzemeyi kırmak için gerekli toplam yararlı iş, ürün çapının kare kökü ile ters, oluşturulan çatlak uzunluğu ve yüzey alanının kare kökü ile doğru orantılıdır» (Bond, 1952) biçiminde belirtilebilir.

K bir orantı sabitini ve X ürün çapını gösterdiğinde,

$$E_T = K/X^* \quad (4)$$

olacaktır. Bu bağıntı Üçüncü Kuramın temel anlatımıdır.

Toplam iş girdisi, E_T , malzemeyi ufalamak için gerekli iş girdileri ile malzemede önceden yapılmış işin toplamıdır.

Bond, malzemelerin belirli bir boyuttan belirli diğer bir boyuta indirgenmesi için gerekli olan enerjinin, E^* saptanmasına ilişkin hesaplamalar da yapmış ve aşağıdaki bağıntıyı çıkarmıştır.

$$E_B = E_T \left(\frac{X_B^* - X^*}{X_B^*} \right) J \quad (5)$$

Daha sonra pratik kullanımlar için Bond, hesaplamalarında diğer bir parametre, İş İndeksi'ni kullanmıştır. İş İndeksi, W_i , bir malzemeyi sonsuz boyuttan %80'i 100 mikron olacak biçimde ufalamak için KWh/ton olarak gerekli enerji olup matematiksel olarak aşağıdaki gibi verilebilir.

$$W_i = E_B \cdot i \frac{X_S^*}{X_B^* - X_i^*} \cdot 1 \left[\frac{X_B}{100} \right]^* \quad (6)$$

İş İndeksi bilindiğinde, malzemeyi belirli bir boyuttan belirli daha küçük bir boyuta İndirmek için gerekli enerji,

$$E_B = W_i \left[\frac{X_B^* - X_o^*}{X_B^*} \right] \left[\frac{100}{X_{tj}} \right]^* \text{ dir. } \quad (7)$$

Bağıntı - 7 yeniden düzenlenirse Bond yasasının en çok bilinen matematiksel İfadesi ortaya çıkar.

$$E_B = W_i \left(\frac{10}{X_o^*} - \frac{10}{X_B^*} \right) \quad (8)$$

Burada;

E_B : Enerji girdisi (KWh/ton)

W_i : İş İndeksi (KWh/ton)

X_B : Besleme malzemesinin %80 boyutu (mikron)

X_o : Ürünün %80 boyutu (mikron) dur.

Bond bağıntılarındaki iş indeksi kırma ve öğütme sorunlarında anahtar değerdir ve malzemenin kırılmaya karşı direnci olarak tanımlanabilir (Bond, 1952). Bu değer değişik ufalama makinalarında yapılan işlemlerin verimlerini karşılaştırmamızı sağlar ve laboratuvar çalışmaları ite ya da tesis verilerinden kolayca hesaplanabilir. Öteki iki yasadan daha çok uygulama atamı bulan Bond kuramı, Bond'a göre tüm boyut aralıklarında geçerlidir. Ancak, Çizelge -1 incelenirse bu yasadan bulunan enerji değerlerinin her durumda uygula-

ma ile çakışmadığı görülecektir. (Hukki, 1962).

Gerçekte bu üç yasa Walker (Walker, 1937) tarafından verilen bir diferansiyel bağıntıdan çıkarılabilir t

$$dE = -C dX/X^n \quad (9)$$

Bağıntı - 9'da;

E: Net enerji gereksinimi (kwh/ton)

X: Örün boyutu

n : İşlemin derecesini gösteren bir üs

C : Malzemeye ve seçilen birimlere bağlı bir sabit,

Bağıntı - 9. n yerine 2, 1 ve 1.5 değerleri konularak intègre edilirse, sırasıyla Rittinger. Kick ve Bond kuramları bulunur.

Sonsuz boyuttan X boyutuna gelmek için gerekli enerji

$$\text{Rittinger} : E_T = C.1/X \quad (\text{kwh/ton}) \quad (10)$$

$$\text{Kick} : E_T = -C.\ln(X/<x) \quad (\text{kwh/ton}) \quad (11)$$

$$\text{Bond} : E_T = 2C.1/X^* \quad (\text{kwh/ton}) \quad \text{olarak,} \quad (12)$$

X₁ boyutundan X₂ boyutuna gelmek için ise:

$$\text{Rittinger} : E = C. (1/X_a - 1/X_j) \quad (\text{kwh/ton}) \quad (13)$$

$$\text{Kick} : E = - C. \ln (X_a/X_j) \quad (\text{kwh/ton}) \quad (14)$$

$$\text{Bond} : E = 2C. (1/X_a^* - 1/X_j^*) \quad (\text{kwh/ton}) \quad (15)$$

olarak elde edilir.

2.4. Charles Kuramı

Charles, Schuhmann'ın boyut dağılımı bağıntısı ile genel enerji bağıntısını (Bağıntı S) birleştirerek kendi enerji bağıntısını türetmiştir (1957). Daha sonra Schuhmann aynı ilişkiyi boyut dağılımı bağıntısından çıkarmıştır (Schuhmann 1959).

Ufalanmış bir ürünün ince boyutlarında malzeme dağılımı genellikle;

$$y = 100 (x/k)^m \quad (16)$$

bağıntısı ile belirlenir. Burada;

y: Birikimli yüzde elekaftı

x : Tane boyu

m : Dağılım modülü

k : Boyut modülüdür

Boyut dağılımları Schuhmann Bağıntısı'na uyan malzemeler için Charles'ın genel enerji - boyut indirgeme bağıntısı;

$$E = A . k^{(1-n)} \quad (17)$$

olarak verilir. Bu ilişkide;

E : Birim hacim başına, enerji girdisi

A; Bir sabit

k : Boyut modülü

n: Bir sabit

1 - n : log k'ya karşı log .E grafiğinin eğimidir.

Bağıntı - 16 ve 17'deki m ve n, malzemenin doğasına ve ufalama makfnastna bağlı sabitlerdir. Charles, deneysel hata sınırları içerisinde bu iki sabit arasında;

$$m - n + 1 = 0 \quad (18)$$

ilişisini göstermiştir (Charles. 1957; Schuhmann, 1959). Bağıntı 17 ve 18 kullanılarak;

$$E = A. k'^m \quad \text{bulunabilir.} \quad (19)$$

Charles, geliştirdiği enerji bağıntısının

$$m - n + 1 = 0$$

eşitliğinin sağlandığı özel durum için geçerli olmadığını belirtmiştir (Charles, 1957). Gene) enerji-boyut indirgeme ilişkisindeki (bağıntı - 17) n değerleri, Charles'ın deneysel çalışmaları sonucu, 1.32 ile 2.4 arasında bulunmuştur.

Öğütme zamanı ile tüketilen enerjinin doğru orantılı olduğunu varsayan Charles, öğütme zamanının boyut modülü, k , ile olan ilişkisini kullanarak bağıntısının geçerliliğini göstermiştir. Ayrıca, Brown - Mitchell - Weismann, kuvars (Brown vd., 1960), Agar ise fosfat kayası üzerinde (Agar, 1965) yaptıkları öğütme çalışmaları ile Charles kuramını doğrulamışlardır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Kuvarsın İrice Öğütülmesi

3.1.1. Malzeme

Yumruk büyüklüğündeki saf kuvars parçaları, sırasıyla, laboratuvar tipi çeneli ve konik kırıcılarda -2.5 mm boyutuna değin kırılmışlardır. Kırılmış malzeme çapraz oluklu bölücülerle azaltılarak öğütme deneyleri, için uygun miktarlarda besleme malzemesi hazırlanmıştır.

3.1.2. Deneysel Yöntemler

Öğütme deneyleri bilyalı değirmen ile yapılmıştır. Değirmen özellikleri ve öğütme işleminin ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

Boyutlar : İç çap 26.8 mm, iç uzunluk 268 mm.

Hız : %70 kritik*

Bilyalar: Boyutları 1-5-3 cm arasında olan 20 kg çelik bilya.

Besleme malzemesi : Kuvars, -2.5 mm, 4 kg.

Öğütme işleminden sonra değirmen önceden belirlenmiş öğütme zamanları sonunda durdurularak karakteristik örnekler alınmıştır. Yaklaşık 50 gr ağırlığındaki örneklerin yerine değirmene eşit miktarda ve benzer boy dağılımlı kuvars eklenmiştir. Böylece değirmen içinde malzeme azalmasından gelebilecek etkiler önlenmiştir. Örnekler üzerinde Coulter Counter yöntemi ile tane boyu dağılımı tayinleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaya ait ayrıntı

tılı bir diğer diğeri bir yayında (Öner, 1981) verilir mi? olduğundan burada yinelenmemiştir.

Öğütme deneyleri kuru ortamlarda kesikli olacak yapıldığından sonuçlar ve irdelemeler yalnızca kuru-kesikli öğütme sistemleri için geçerlidir.

3.2. Fosfat Kayası İnce Öğütülmesi

Laboratuvar çaplı bilyalı değirmende kuvars öğütülmesine ilişkin sonuçların yanında, endüstriyel çaplı bilyalı değirmenlerde yapılan ince öğütme sonuçlarını da yasalara uyup uymadığı araştırılmıştır.

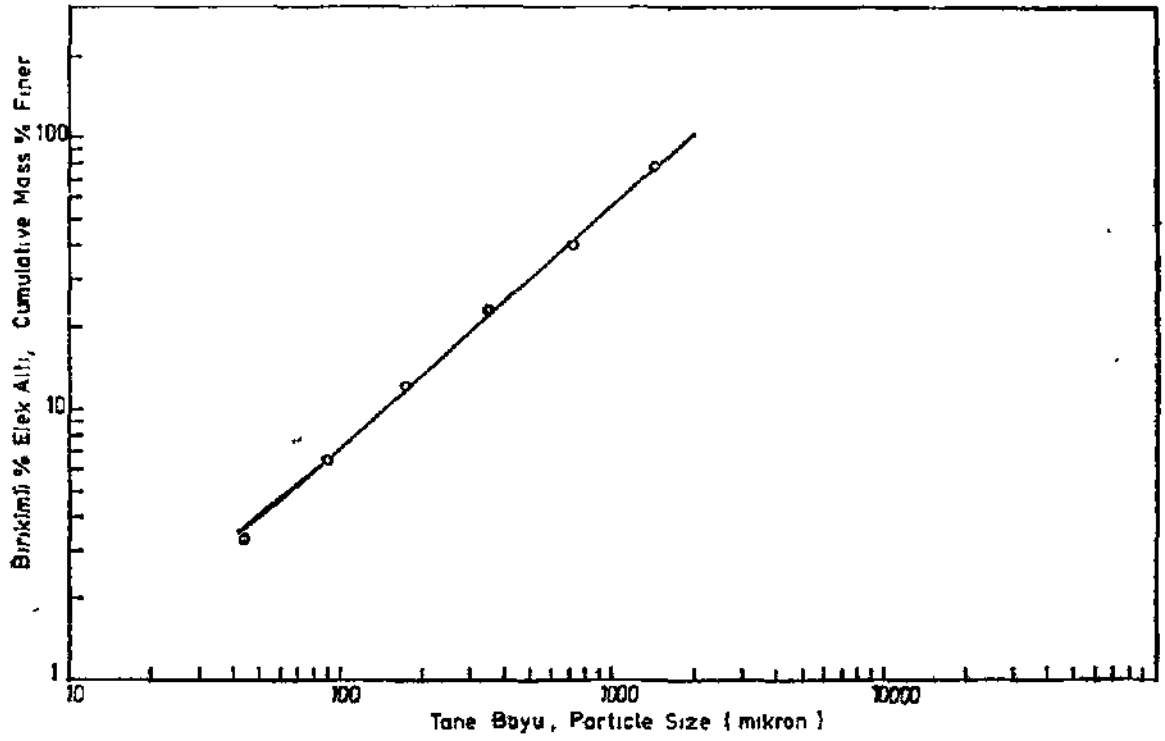
Bu amaçla yazınımdan yararlanılmış, Agar (Agar, 1965) yayınladığı bir yazıdan elde edilen fosfat kayasının endüstriyel çaplı bilyalı değirmende öğütülmesi

saplamalarda kullanılmıştır. Sözü edilen çalışmada öğütme işlemi kuru-sürekli olarak yapıldığından değerlendirmeler sadece benzer öğütme koşullarını niteleyecektir.

Çizelge 4'de belirtildiği gibi Agar'ın çalışmasında ölçülen enerji değerleri bilyalı değirmen + sınırlandırıcı devresinde harcanan toplam enerjidir. Çizelge 5'de verilen değerlerin hesaplanmasında bu değerler değiştirilmeden kullanılmış yani enerjinin tümünün değirmende tüketildiği varsayılmıştır. Bu çalışmada amaç enerjiyi karşılaştırılması olduğundan, bu varsayımın bir sakıncası yoktur. Ayrıca bayie bir devrede, değirmende harcanan öğütme enerjisinin sınıflandırıcı harcaman enerjiden çok daha fazla olduğu binmektedir.

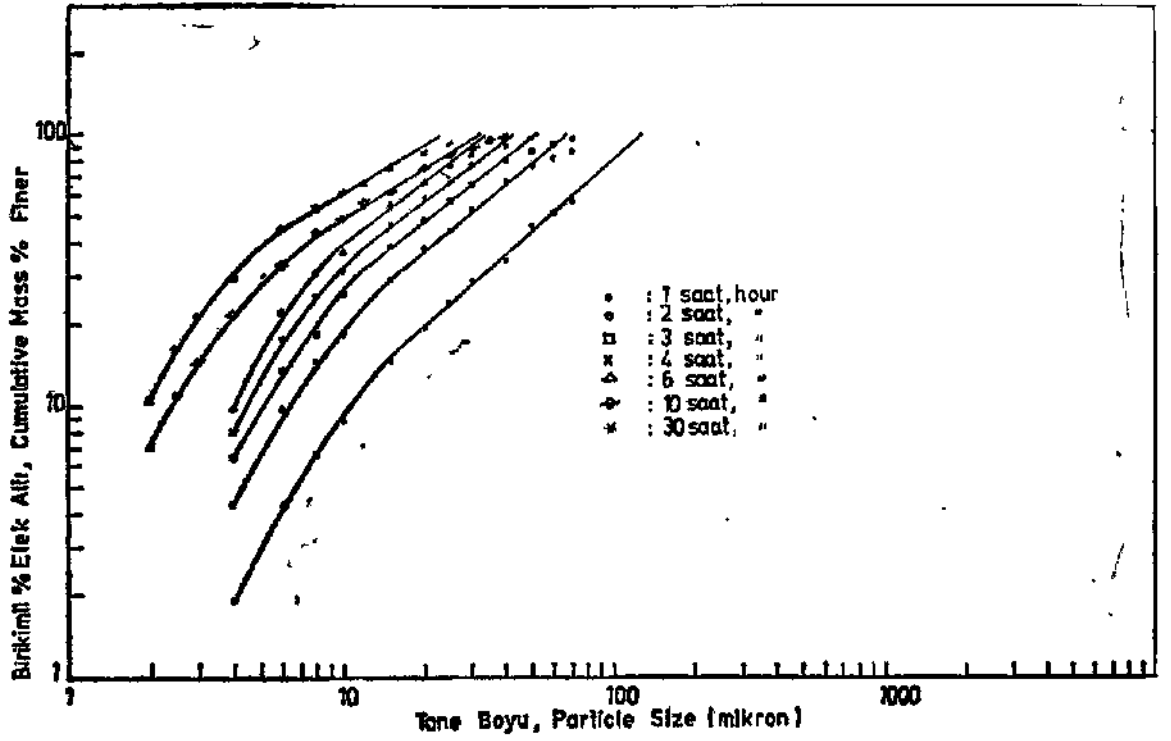
3.3. Değerlendirme ve Sonuçlar

Öğütme deneylerinde besleme malzemesi olarak kullanılan kuvarsın tane boyu dağılımı 9'ın 1'inde, değişik öğütme zamanları sonunda elde edilen ürünlerin tane boyu dağılımları ise Şekil 3 ve 4'te gösterilmiştir. Çizelge 2 deneylere ilişkin bilgiler ve sözkonusu grafiklerden, alınan



Çizelge 2. Bityalı Değirmen Öğütmesinin Özeti

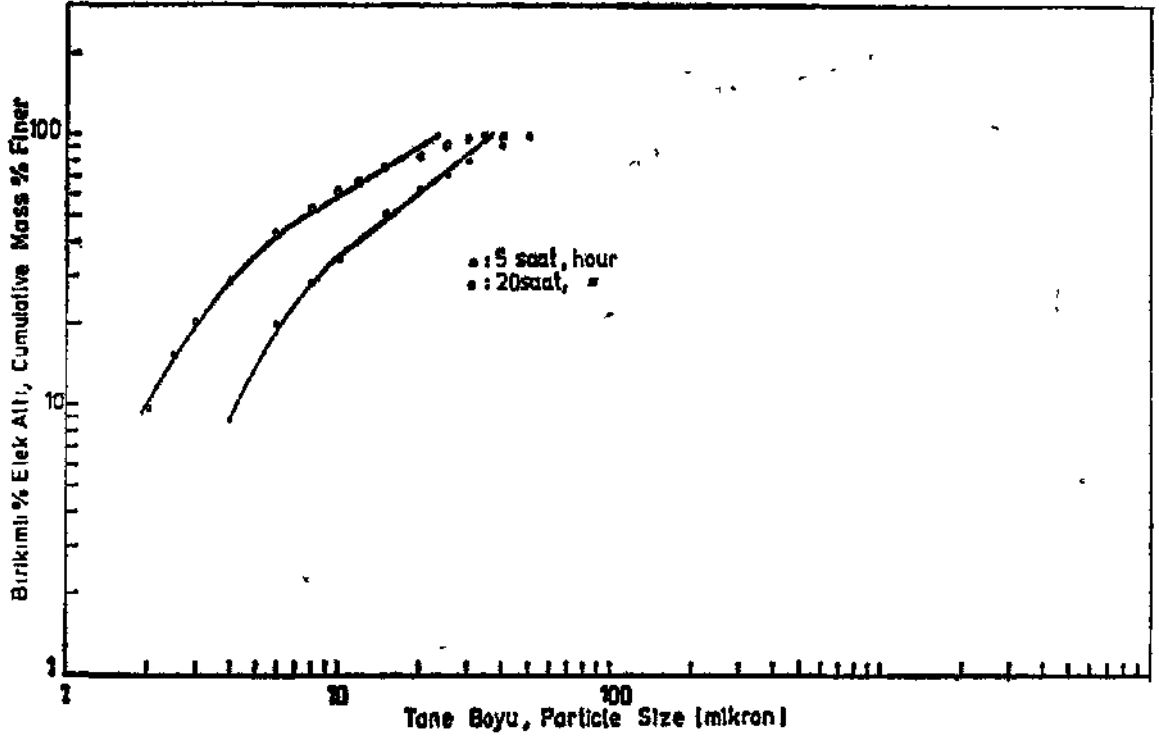
DENEY	ENERJİ (kwh/t)	ÖĞÜTME ZAMANI (saat)	BOYUTLAR (mikron)			
			% 50	% 80	% 100 (k)	m
1.1	16.1	1	57.0	97.0	124.0	0.90
1.2	29.6	2	28.5	51.0	67.0	0.83
1.3	42.7	3	21.0	38.0	51.0	0.79
1.4	55.8	4	16.8	31.8	42.0	0.77
1.5	69.3	5	15.5	28.0	36.5	0.79
1.6	83.0	6	13.8	25.0	34.0	0.78
2.1	139.1	10	10.4	22.0	32.0	0.63
2.2	280.7	20	7.6	16.2	23.0	0.63
2.3	408.7	30	7.2	15.6	22.5	0.61
Besleme malzemesi			860.0	1500.0	1910.0	0.85
1 — n = 1.49						



Şekil 3.

Çizelge 3. Kuramsal Enerji Değerleri ve Uygulamada Gösterdikleri Sapmalar.

DENEY	RITTINGER		KICK		BOND		CHARLES	
	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)
1.1	16.1	0.0	16.1	0.0	10.6	34.2	16.1	0.0
1.2	33.3	12.5	20.2	31.7	18.0	45.9	40.2	38.1
1.3	45.6	6.9	22.0	48.4	19.2	55.0	60.5	41.6
1.4	57.4	2.0	23.3	58.2	21.3	61.8	80.8	44.8
1.5	62.3	10.1	23.8	65.5	22.9	68.9	99.6	43.7
1.8	70.1	15.5	24.5	70.5	24.5	70.5	110.7	33.4
2.1	93.4	32.8	26.2	81.2	26.3	81.1	121.2	12.8
2.2	128.2	54.3	28.1	90.0	31.3	88.8	188.2	29.4
2.3	135.4	66.8	28.4	93.1	31.9	92.2	204.7	49.8



Şekil 4.

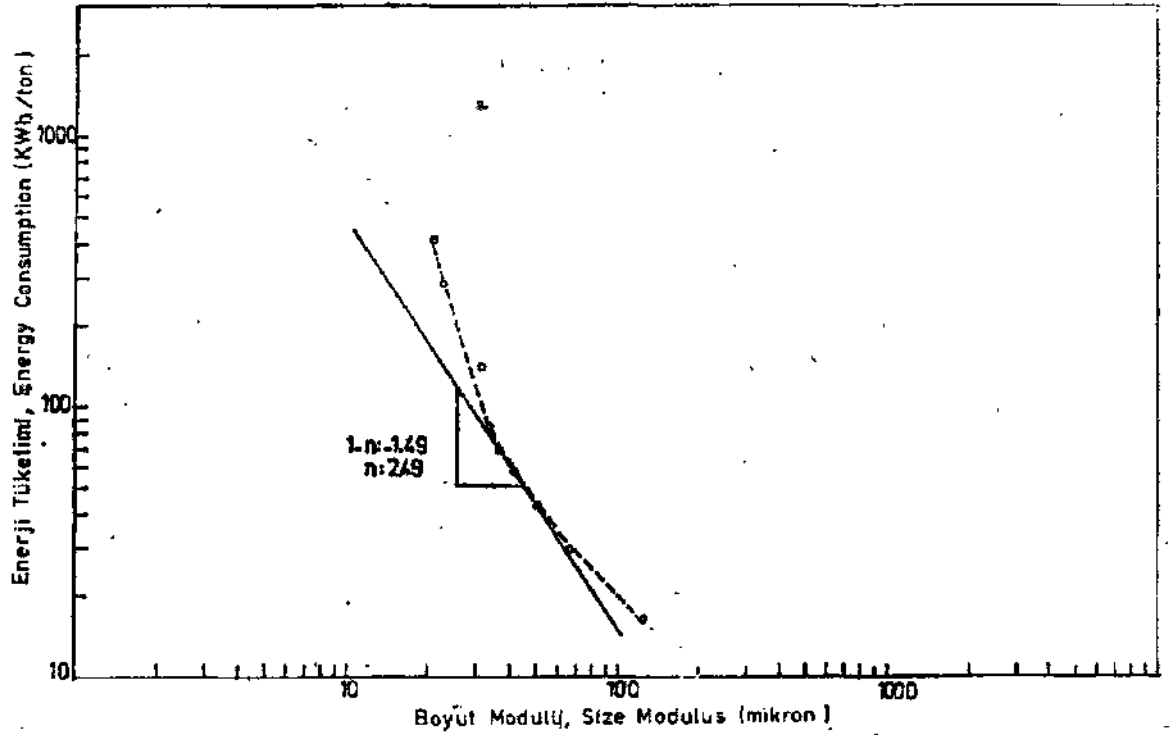
Çizelge 4. Bilyalı Değirmende Fosfat Kayasının İnce Öğütülmesinden Alınan Sonuçlar.

GRUP	BOYUTLAR (mikron)			ENERJİ* (kwh/t)	1 - n
	m	% 50	% 80		
1	0.61	49	108	154	1.3
		36	80	114	
		28	61	88	
2	0.63	53	114	162	1.5
		39	85	123	
		26	58	81	
3	0.60	48	118	155	1.25
		39	86	125	
		21	48	69	

* Enerji tüketimi değirmen ve sınıflandırıcıda tüketilen enerjilerin toplamıdır.

sonuçları içermektedir. Besleme malzemesinin ve ürünlerin %50, %80 tane boyları ile çalışılan malzemenin (kuvarsin) iş indeksi bilindiğinde Rittinger, Kick ve Bond yasalarına ilişkin kuramsal enerji girdileri saptanabilir. Buna karşılık Charles enerji girdisinin hesaplanabilmesi için 1 - n değerinin de bilinmesi gereklidir. Bu

değer Enerji Tüketimi - Boyut Modülü grafiğinin eğimidir ve 1.49 olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Çizelge. 2 kullanılarak hesaplanan kuramsal enerji değerleri ve bu enerji değerlerinin uygulamadan gösterdikleri sapmalar Çizelge 3'te görülmektedir. Çizelge 3'ün grafiksel gösterimi Şekil 6'da verilmiştir.-.



Şekil 5.

Çizelge 5. Fosfat Kayası Öğütülmesinde Kuramsal Enerji Değerleri ve Uygulamadan Gösterdikleri Sapmalar.

DENEY	RİTTİNGER		KICK		BOND		CHARLES	
	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)	Enerji (kwh/t)	Sapma (%)
1	4631	44.3	40.47	26.1	1.57	92.9	22.91	0.4
2	55.54	29.4	44.58	13.7	3.22	89.9	32.08	0.1
3	117.55	191.4	84.00	108.4	3.80	90.3	38.74	1.2
					1.60	92.4	20.67	2.0
					5.29	86.8	43.45	7.8

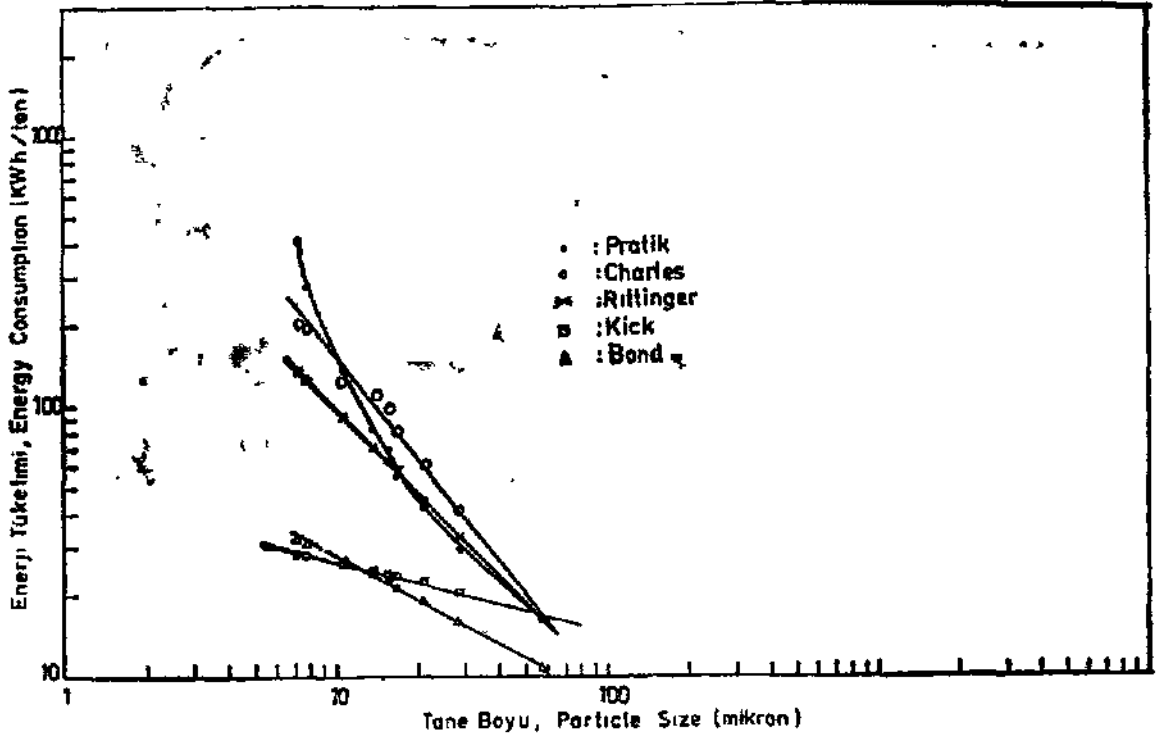
Çizelge 3 yada Şekil 6 incelendiğinde, çalışılan tane boylarında Rittinger ve Charles yasalarından bulunan kuramsal enerji değerlerinin pratik enerji değerlerine daha çok yaklaştığı görülecektir. Bunun yanında Kick ve Bond enerji değerleri uygulamadan oldukça büyük sapmalar göstermişlerdir. Kuşkusuz bu sonuçlar sözkonusu ufalama sistemi (kuru - kesikli) ve öğütme tane boyları için geçerli olacak, başka koşullarda değişik sonuçlar alınabilecektir.

Fosfat kayasının İnce öğütülmesinde elde edilen veriler Çizelge 4'te görülmektedir. Bu verilerin matematiksel olarak değerlendirilmesi ile Çizelge 5 oluşturulmuştur. Çizelge 5 incelendiğinde Charles yasasından hesaplanan kuramsal enerji değerlerinin uygulamada tüketilen enerji değerlerine oldukça yakın olduğu görülecektir. Buna karşılık Rittinger, Kick ve Bond yasalarında bulunan enerji değerleri uygulamadan daha büyük sapmalar göstermiş-

lerdir. Daha önce de belirtildiği gibi bu sonuçlar yalnızca kuru - sürekli öğütme sistemleri için geçerli olacaktır.

Sonuç olarak, ince tane gereksiniminin giderek arttığı boya. Hac, çimento, seramik, deterjan, v.b. endüstri kollarında öğütme enerjisi hesaplamalarında Charles ve Rittinger yasalarının daha yaklaşık değerler vereceği söylenebilir.

Öte yandan, m ile 1 - n arasında Charles ve Schuhmann'ın öngördüğü uyum çalışmamızda elde edilememiştir. Ancak yazımda iki değer arasındaki bu uyumsuzluğun özellikle bilyalı değirmenlerde gözlemlendiğine ilişkin bilgiler vardır (Agar, 1965). İnce tanelerin yüksek sıcaklık etkisiyle sinterlenmesi bilyalı değirmenlerde daha fazla olduğundan büyük 1 - n değerleri elde edilmektedir. Bundan başka, kuvars gibi iyi kristallenmiş malzemelerin öğütülmesinde de, malzeme dayanımı arttığandan, 1 - n değerleri büyük olmaktadır (Agar, 1965).



Şekil 6.

KAYNAKLAR

1. Agar, G JE., 1965, Energy-Size Analysis of Phosphate Rock Grinding : AIME Transactions, 232,153 -159.
2. Bayraktar, t, 1975. Kırmada Malzeme Özellikleri ve Kırma Mekanizmasının Etkisi; Enerjinin Kullanılması: Madencilik Dergisi, 16, 3, 29 - 34.
3. Bond, F.C., 1952, The Third Theory of Comminution : AIME,Transactions, 193, 484-494.
4. Brown, J.H., Mitchell, SJR., Weissman, M., 1960, Energy-Size Reduction Relationship for the Grinding of Quartz : AIME Transactions, 217, 203 - 206.
5. Charles, RJ., 1957, Energy-Size Reduction Relationships in Comminution : AIME Transactions, 208, 80 - 88.
6. Harris, C.C., 1967, On the Limit of Comminution : Trans. Soc. of Mining Engineers, p. 17 - 30.
7. Hukki, R.T., 1962, Proposal for a Solomonic Settlement Between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond: AIME Transactions, 223, 403 - 408,
8. Öner, M., 1981, Sodyum Oleatın Kuvarın Çok ince öğütülmesi Üzerindeki Etkileri: Madencilik, Cilt 20, Sayı 1-2, 23-35.
9. Rumpf, H., 1962, Dechema Zerkleinern Sympson.
10. Schuhmann, R, Jr., 1959, Energy Input and Size Distribution in Comminution : AIME Transactions, 214, 22 - 25.
11. Taggart, AJF., 1914, The Work of Crushing: AIME Transactions, 48, 153 -179.
12. Utine, M.T., 1975, Öğütme Kinetiği: TÜBİTAK V. Bilim Kongresi (Maden - Metallurji Seksiyonları), 55-76.
13. Walker, H.W. ve diğerleri., 1937, Principles of Chemical Engineering 3rd edition. New York, Mc Graw Hüel.