

KLİNKER VE ÇİMENTO KATKILARININ TEK TANE DARBE KIRILMA KARAKTERİSTİĞİNİN AĞIRLIK DÜŞÜRME TEKNİĞİ İLE ANALİZİ

Analysis of single particle breakage characteristics of cement clinker and cement additives by Drop-Weight Technique

Ömürden GENÇ(*)
A.Hakan BENZER(**)

ÖZET

Bu çalışmada klinker, kalker, tras, ve alçıtaşı örneklerinin çift darbe kırılma davranımları ağırlık düşürme testi ile incelenmiştir. Kırılmış ürün tane boyu dağılımları, dağılımların %50'sinden geçen tane boyuna göre normalize edilmiş ve özgül ufalama enerjisi seviyesinin kırılma dağılımı benzerliğine etkisi incelenmiştir. Klinker, kalker ve trasın kırılma dağılımlarının 1 kW/ton'un üzerindeki enerji seviyelerinde benzerlik gösterdiği, alçıtaşının ise enerji seviyesinden bağımsız kırıldığı belirlenmiştir. Özgül ufalama enerjisi-boyut küçültme ilişkileri Narayanan ve Whiten'in (1983) yaklaşımına göre oluşturulmuş ve klinkerin darbe kırılma davranımının tane boyuna bağlı olduğu belirlenmiştir. Birden fazla bileşenin aynı anda öğütüldüğü CEM II/B Portland Kompoze Çimento üretimi koşulu için kırılma dağılım fonksiyonunun t-aile eğrisi yaklaşımına göre belirlenmesi aşamaları tartışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Kırılma Dağılımı Fonksiyonu, Ağırlık Düşürme Testi, Klinker, Çimento

ABSTRACT

In this study, double impact breakage characteristics of clinker, limestone, trass and gypsum samples were investigated by the drop-weight test. Broken product size distributions were normalized based on 50% passing size of the distributions and effect of specific comminution energy on breakage distribution similarity was investigated. It was determined that, at energy levels higher than 1 kWh/ton breakage distributions of clinker, limestone and trass showed similarity, whereas breakage of limestone is independent of energy level. Specific comminution energy-size reduction relations were established based on the approach given by Narayanan and Whiten (1983) and it was determined that breakage of clinker is size dependent. Determination of breakage functions based on the t-family curve approach for CEMII/B Portland Composite Cement production case in which more than one component was ground was discussed.

Keywords: Breakage Distribution Function, Drop-Weight Test, Clinker, Cement

(*)Araş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara, ogenc@hacettepe.edu.tr

(**)Doç.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, Beytepe, Ankara

1. GİRİŞ

Malzemelerin kırılma davranımlarının belirlenmesi, boyut küçültme işleminin matematiksel modellenebilmesi açısından önem taşımaktadır. Boyut küçültme modelleri ise bir optimizasyon aracı olan simülasyon tekniğinin önemli bir parçasıdır. Boyut küçültme işlemi matematiksel olarak Epstein (1948) tarafından önerilen iki temel parametre yardımı ile ifade edilmektedir. Bunlardan biri ufalama ekipmanının tasarım ve işletme değişkenlerine bağlı olan seçim veya kırılma hızı fonksiyonu adı verilen, malzemenin ekipman içerisinde kırılma olasılığını belirleyen parametredir. Diğer parametre ise malzeme yapısına bağlı olarak değişen ufalama ekipmanının değişkenlerinden bağımsız olan, malzemenin ekipman içinde kırıldıktan sonra kendinden ince boylara ne şekilde dağılacığını belirleyen kırılma dağılımı fonksiyonudur. Boyut küçültme ekipmanları, Epstein'in önerdiği bu iki temel mekanizmaya dayalı olan matris (Broadbent ve Callcott, 1956) ve kinetik modelleme (Gardner ve Austin, 1962; Herbst ve Fuerstenau, 1968;1972;1980) yaklaşımları ile modellenmektedir. Boyut-kütle denkliği ya da popülasyon denge modelleri olarak bilinen kinetik modeller öğütmenin birinci dereceden bir hız prosesi olduğu hipotezine dayanarak geliştirilmiş yaklaşımlardır. Whiten (1972) Epstein (1948) tarafından önerilen boyut-kütle denkliği model yaklaşımının bir versiyonu olarak mükemmel karışım modelleme yaklaşımını geliştirmiştir. Yaklaşım, değirmenin mükemmel karışım tek bir birimden meydana geldiğini kabul etmekte ve tane boyu ile kütle arasında kurulan kütle denkliğine dayanmaktadır. Bilyalı değirmen modellenmesinde yaygın uygulama alanı bulmuş olan ve Eşitlik 1'de verilen mükemmel karışım öğütme modelinde kırılma dağılım fonksiyonu (a_{ij}) üçgen matris olarak ifade edilmekte ve kırılma dağılımı matrisinin ilk kolonunu oluşturan bir ürün vektörü şeklinde tanımlanmaktadır.

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \left(\frac{r_j}{d_j} \right) - p_i \left(\frac{r_i}{d_i} \right) - p_i = 0 \quad (1)$$

Eşitlikte;

f_i : Beslemede i tane boyut aralığında bulunan malzeme miktarı

p_i : Değirmen ürününde i tane boyut aralığında

bulunan malzeme miktarı

d_i : Özgül taşınma hızı

r_i : Özgül kırılma hızı

a_{ij} : j boyutundaki malzemenin i boyutuna dağılmasını tanımlayan kırılma dağılımı fonksiyonu

f_i ve p_i boyut dağılımlarının örneklenerek, malzemenin karakteristik kırılma dağılımı a_{ij} değerlerinde laboratuvarında belirlenmesi durumunda tane taşınma hızına bağlı kırılma hızı (r/d) parametresi geri hesaplanarak değirmen model yapıları oluşturulabilmektedir.

Malzemeye özgü kırılma dağılımı fonksiyonlarının ifade edilmesine yönelik farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir (Broadbent ve Calcott, 1956; Kelsall, 1965; Gardner ve Austin, 1962; Austin vd.,1984). Kırılma dağılım fonksiyonlarının eşitliklerle ifadesinin kırılma işlemlerini ifade etmede yetersiz kalması, matematiksel modelleme ve simülasyon tekniklerinin kırma-öğütme devrelerinin optimizasyonu ve tasarımında kullanılmasının giderek yaygınlaşması kırılma dağılım fonksiyonunun deneysel olarak karakterize edilmesini ön plana çıkarmaktadır.

Literatürde, malzemelerin kırılma davranımlarının incelenmesinde özellikle tek taneler üzerinde yürütülen kırma testleri geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Fairs,1954; Schönert, 1972; Pauw ve Mare, 1988). Tek tane kırma test yöntemleri, tek darbe ve çift darbe testleri olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Tek darbe test yöntemlerinde kırılma olayı, tanenin serbest düşürülmesi ya da sert bir yüzeye yüksek hızda fırlatılarak tek bir darbe olayına uğratılması şeklinde gerçekleşmektedir. Çift darbe testleri ise, test edilen malzemenin iki sert yüzey arasında kırılması temeline dayanmaktadır. Malzemelerin karakteristik kırılma dağılım fonksiyonunun laboratuvar koşullarında belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntem tek tane çift darbe testidir. Deneyler şu yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir:

1. İkiz Sarkaç Testi (Fahernwald, 1938; Gaudin ve Hukki, 1946; Zeleny ve Piret, 1972; Yashima, 1981;1982; Narayanan, 1983; Brown, 1997; Weedon ve Wilson, 2000)
2. Çok Hızlı Yük Hücresi Yöntemi (UFLC) (Krogh, 1979; Yashima, 1987; Weichert,

- 1990; Höffler ve Herbst, 1990; Schönert, 1991; Bourgeois, 1992; Tavares, 1998)
3. Hopkinson Basınç Çubuğu Yöntemi (Napier Munn vd.,1996)
 4. Ağırlık Düşürme Yöntemi (Gross, 1938; Piret, 1953; Fairs, 1954; Arbiter, 1969; Schönert, 1972; Rumpf, 1973; Narayanan ve Whiten, 1983; Narayanan, 1985;1986; Asim,1984; Leung, 1987; Pauw ve Mare, 1988; Kanda vd., 1989; Andersen, 1988; Tavares, 1999; Man,2000; Weedon et al, 2000; Banini, 2000; Weedon, 2001; Man, 2001)

Ağırlık düşürme yöntemi, literatürde yer alan tek tane kırma test yöntemleri arasında en yaygın uygulama alanı bulmuş olanıdır. Kırma test sonuçları özellikle bilyalı ve otojen değirmenlerin matematiksel modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır.

Çalışmada, üç farklı çimento öğütme tesisinden alınan klinker, kalker, tras ve alçıtaşı numunelerinin tek tane darbe kırılma davranımları ağırlık düşürme yöntemi ile karakterize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, klinkerin boya bağlı kırılma davranımını ortaya koymuştur. Ayrıca klinker, kalker ve tras numunelerinin tane boyutundan bağımsız hale getirilmiş kırılmış ürün dağılımları incelenmiş ve 1kWs/ton'un üzerindeki enerji seviyelerinde farklı fraksiyonların benzer şekilde kırıldığı ortaya konmuştur. Alçıtaşı ise enerji seviyesinden bağımsız bir kırılma dağılımı sergilemiştir. Birden fazla bileşenin aynı anda öğütülmesi koşulunda toplam değirmen beslemesinin kırılma dağılımı fonksiyonu tek parametreliliğe eğrisi yaklaşımına (Narayanan ve Whiten, 1988) göre belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Ağırlık Düşürme Deney Düzeneği

Deneyde kullanılan ağırlık düşürme düzeneğinin bir fotoğrafı Şekil 1'de verilmektedir. Düzenekte çelik örsün merkezine yerleştirilen tek tane, ağırlık ve yükseklik ayarı ile istenilen enerji seviyesinden kırılmaktadır. Ağırlıklar bir elektromıknatıs ile tutulmakta ve mekanik bir kol yardımıyla istenilen yüksekliğe çıkarılabilmektedir. Belirli yüksekliğe çıkarılan ağırlıklar, sistemdeki devre kesici aracılığıyla elektromıknatıslara gelen akımın kesilmesiyle tanenin üzerine serbest

düşürülmektedir. Deney sırasında malzeme kaybını önlemek amacıyla düzeneğin etrafı alüminyum bir plaka ile çevrilmiştir. Yükseklik 0-50cm, ağırlıklar ise 5.87-50kg arasında ayarlanabilmektedir. Bu oldukça geniş enerji aralığında çalışabilme olanağı sağlamaktadır.



Şekil 1. Ağırlık düşürme deney düzeneğinin genel görünümü.

2.2. Malzeme ve Deneysel Yöntem

Çalışmada üç farklı klinker ile kalker, tras ve alçıtaşı örneklerinin kırılma karakteristikleri belirlenmiştir. Klinker, kalker, tras ve alçıtaşı ana besleme bantlarından yaklaşık 50-60 kg aralığında değişen miktarlarda numuneler alınmıştır. Örnekler laboratuvarda, test için seçilen dar tane boyu fraksiyonlarına kuru olarak elde edilmiştir. Elde edilen fraksiyonel bazdaki numunelerden bir bölücü yardımıyla belirli miktarlarda temsili tane fraksiyonları hazırlanmış ve bu fraksiyonlarda bulunan tane sayısı belirlenmiştir. Her fraksiyondan kırılacak tane sayısının belirlenmesinde tane fraksiyonu iriliği göz önünde bulundurulmuş ve seçilen tanelerin toplam ağırlığının temsili elek analizi yapmaya yetecek miktarda (en az 50g) olmasına dikkat edilmiştir. Tane boyu inceldikçe kırılacak tane sayısı artırılmıştır. Farklı özgül ufalanma enerjisi seviyelerinden kırılmak üzere gruplandırılan ve belirli sayıda tane içeren fraksiyonların herbirinin toplam ağırlığı belirlenmiş, tek tane

ağırlıkları hesaplanmıştır. Ağırlık düşürme deney düzeneğinde, taneye uygulanan yükleme enerjisi düşürülen ağırlığın potansiyel enerjisine eşit olup Eşitlik 2 ile ifade edilmektedir.

$$E_i = m_d g h_d \quad (2)$$

Eşitlikte, E_i , yükleme enerjisi (joule), m_d , düşürülen ağırlığın kütleini (kg), g , yerçekimi ivmesini, h_d , ağırlığın düşürüldüğü yüksekliği (m) ifade etmektedir. Özgül ufalanma enerjisi seviyesi ise Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$E_s = \frac{2.78 \times 10^{-7} (m_d g h_d)}{m_t} \quad (3)$$

Eşitlikte, E_{cs} , özgül ufalanma enerjisini (kWs/t), m_t , tek tane ağırlığını (ton) ifade etmektedir.

Test sırasında özellikle iri boyut fraksiyonlarında yaklaşık olarak test edilen boyut aralığının

geometrik ortalamasının yarısı kadar bir yüksekliğin sağlayacağı potansiyel enerji kullanılamamaktadır. Bu nedenle, ağırlığın tane üzerine düşürülmesinden sonra çelik örsün yüzeyi ile ağırlık arasında kalan mesafenin (h_r) yaklaşık belirlenebilmesi amacıyla 10 ölçüm alınmış ve h_r , bu değerlerin ortalaması kabul edilmiştir. Bu durumda, ağırlığın düştüğü net yükseklik h_d , $h-h_r$ farkı olarak alınmıştır. Her boyut fraksiyonu için seçilen özgül enerji seviyeleri deney düzeneğinde ağırlık ve yükseklik ayarlaması yapılarak elde edilmiş ve belirlenen enerji seviyelerinden taneler tek tek kırılmıştır. Herhangi bir tane boyu fraksiyonunda bulunan her bir tanenin belirli bir yükleme enerjisi seviyesinden kırılması sonucunda elde edilen kırılmış ürün harmanlanmış ve kuru elemeye $\sqrt{2}$ elek serisi kullanılarak tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Test için seçilen boyut fraksiyonları, her enerji seviyesinde kırılmış tane sayısı, özgül ufalanma enerjisi seviyeleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1. Ağırlık düşürme test koşulları

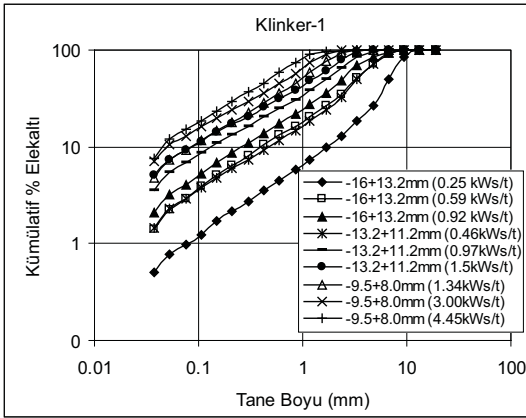
Numune adı	Tane fraksiyonu (mm)	Her enerji düzeyinde kırılan tane sayısı	Özgül enerji düzeyleri (kWs/t)
		Tesis-A	
Klinker-1	-16+13.2	25	0.25-0.59-0.92
	-13.2+11.2	40	0.46-0.97-1.50
	-9.5+8.0	60	1.34-3.00-4.45
Kalker	-16+13.2	25	0.22-0.52-0.80
	-13.2+11.2	40	0.34-0.81-1.21
	-9.5+8.0	60	1.19-2.67-3.90
Tras	-16+13.2	30	0.39-0.80-1.22
	-13.2+11.2	50	0.60-1.28-1.89
	-9.5+8.0	70	1.72-3.87-5.61
Alçıtaşı	-16+13.2	26	1.09-0.72-0.34
	-13.2+11.2	36	0.59-1.26
	-9.5+8.0	70	1.82-5.73
		Tesis-B	
Klinker-2	-13.2+11.2	90	0.19-0.28-0.34
	-9.5+8.0	140	0.56-0.75-1.12
	-5.6+4.75	250	4.02-5.51
		Tesis-C	
Klinker-3	-13.2+11.2	100	0.19-0.26-0.34-2.46-5.05
	-9.5+8.0	150	0.51-0.74-1.04-3.17-4.31-4.88
	-5.6+4.75	255	2.73-4.16-5.51-8.08

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Test numunelerinin seçilen tane boyu fraksiyonlarının farklı özgül ufalanma enerjisi seviyelerinden kırılmalarıyla elde edilen ürünün 0.038 mm'ye kadar tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Özgül ufalanma enerjisi seviyesine bağlı olarak değişen tipik kırılmış ürün boyut dağılımları Klinker-1 örneği için Şekil 2'de gösterilmektedir.

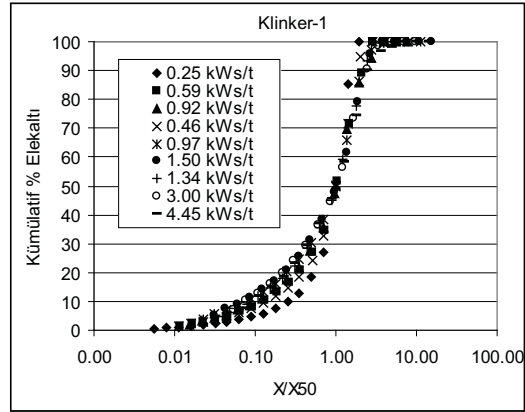
Her numunenin fraksiyonel bazda kırılma şeklindeki benzerliğin enerji seviyesine bağlı olarak incelenebilmesi amacıyla, kırılmış fraksiyonların boyut dağılımlarının %50'sinden geçen tane boyu X_{50} (mm) belirlenmiş ve dağılımlar X_{50} boyutuna göre normalize edilmiştir. Tane boyutundan bağımsız hale getirilen dağılımlar, kırılma şekline enerji seviyesinin etkisini ortaya koymaktadır.

Numunelerin normalize dağılımları Şekil 3, 4, 5, 6, 7, 8'de sunulmaktadır.

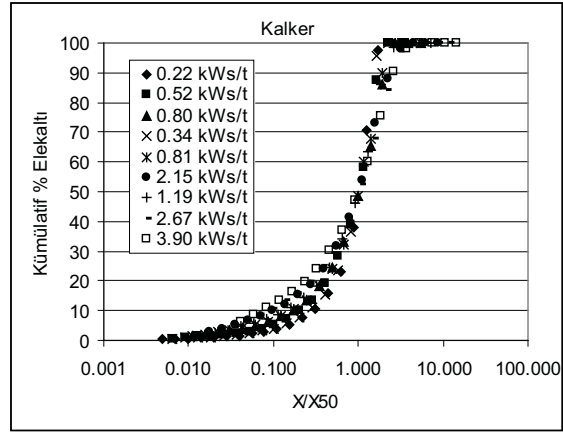


Şekil 2. Klinker-1 kırılmış ürünü tane boyu dağılımları.

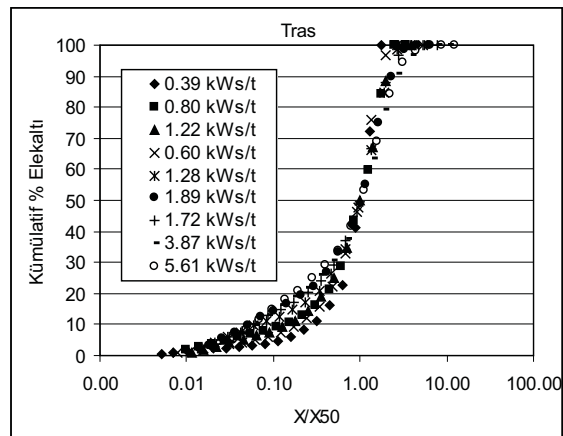
Alçıtaşı dışındaki numunelerin özgül enerji seviyesine bağlı olarak farklı bir kırılma dağılımı sergilediği görülmektedir. Alçıtaşı için seçilmiş olan enerji seviyelerinin yüksek olması nedeniyle her tane fraksiyonu kendi içerisinde farklı enerji seviyelerinde kırılma şekli açısından benzerlik göstermektedir. Kalker, tras ve klinker numunelerinin ortalama 1 kW/ton'un altındaki enerji seviyelerinde kırılmış ürün boyut dağılımı benzerliğinin farklılaştığı görülmektedir. Tane boyu irileştikçe ve enerji seviyesi düştükçe ($E_{cs} < 1 \text{ kW/ton}$) kırılma şeklindeki benzerlik



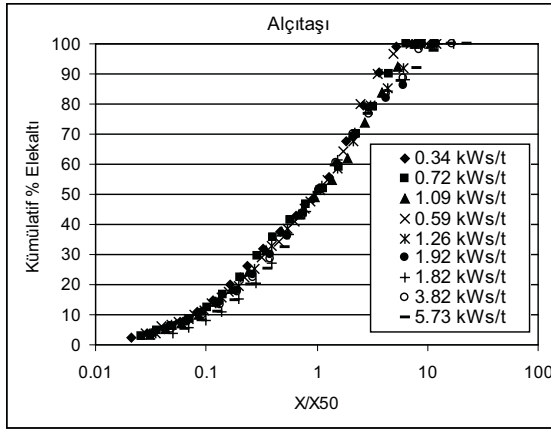
Şekil 3. Klinker-1 numunesi normalize kırılma dağılımları.



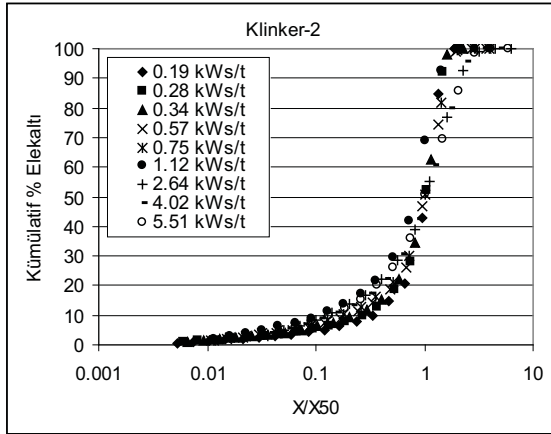
Şekil 4. Kalker numunesi normalize kırılma dağılımları.



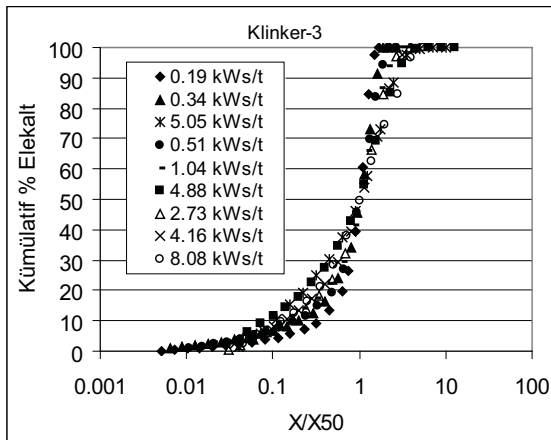
Şekil 5. Tras numunesi normalize kırılma dağılımları.



Şekil 6. Alçıtaşı numunesi normalize kırılma dağılımları.



Şekil 7. Klinker-2 numunesi normalize kırılma dağılımları.



Şekil 8. Klinker-3 numunesi normalize kırılma dağılımları.

bozulmaktadır. Bunun nedeni tane boyundaki irileşmeye bağlı olarak tanenin içerebileceği yapısal kusurların miktarındaki artış ile tane boyu bazında değişen mineral faz özellikleri olabilir. Yapısal kusurların kırılmaya olan etkisinin düşük enerji seviyelerinde daha da belirginleştiği söylenebilir. 1 kW/s/ton kırılma şeklindeki benzerliğin değiştiği bir geçiş enerji düzeyi olup her tane fraksiyonu 1 kW/s/ton'un üzerindeki enerji seviyelerinde benzer şekilde kırılmaktadır.

3.1. Özgül ufalanma enerjisi- t_{10} modeli

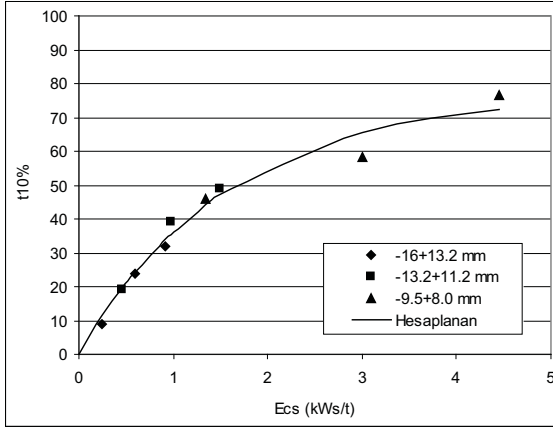
Her numunenin darbe altındaki kırılma karakteristiği farklı boyutlardaki tanelerin kırılmış ürün incelikleri baz alınarak oluşturulan özgül ufalanma enerjisi ve t_{10} ilişkileri aracılığı ile belirlenmiştir. Bu yaklaşımda boyut küçültme t_{10} dağılım parametresi ile temsil edilmektedir. Literatürde t_{10} , incelik ya da kırılma indeksi olarak anılmakta ve kırılmış ürün tane boyu dağılımlarından belirlenmektedir (Napier Munn vd., 1996). Narayanan ve Whiten (1983) taneye uygulanan enerjinin tane ağırlığına bölünmesiyle elde edilen özgül ufalanma enerjisi ile ürün boyut dağılımının inceliğini temsil eden t_{10} parametresi arasındaki ilişkiyi Eşitlik 4 ile ifade etmektedir.

$$t_{10} = A(1 - e^{-E_{cs}}) \quad (4)$$

t_{10} : Test edilen tane boyu aralığının geometrik ortalamasının 1/10'undan geçen kümülatif malzeme yüzdesi
 E_{cs} : Özgül ufalanma enerjisi (kW/s/t)
A ve b : Malzeme özelliklerine bağlı parametreler

E_{cs} - t_{10} ilişkileri konvansiyonel olarak iri boyut fraksiyonlarının düşük, ince boyut fraksiyonlarının yüksek özgül ufalanma enerjisi seviyelerinden kırılmasıyla elde edilen t_{10} değerleri bazında oluşturulmaktadır. Bu şekilde oluşturulan E_{cs} - t_{10} ilişkilerinden geri hesaplanan A ve b model parametreleri farklı tane boylarının kırılma karakteristiklerinin bir ortalamasını yansıtmaktadır. Bu duruma örnek olarak Şekil 9'da klinker-1 örneği için oluşturulan E_{cs} - t_{10} ilişkisi gösterilmiştir. Çizgi ile gösterilen ve hesaplanan olarak nitelendirilen değerler E_{cs} - t_{10} modeline deneysel verilerin uyumunu ifade etmektedir. T_{10} değerinin geniş bir boyut küçültme enerjisi

aralığında boyut dağılımı inceliğindeki değişimin izlenebilmesini sağlaması nedeniyle kırılmış ürünün inceliğini en iyi temsil eden dağılım parametresi olduğu söylenebilir (Genç,2002).



Şekil 9. Klinker-1 örneğinin $E_{cs}-t_{10}$ ilişkisi.

$E_{cs}-t_{10}$ eğrilerinde belirli bir özgül ufalanma enerjisi seviyesinden sonra, ürün inceliğinde bir değişim gözlenmemekte ve A parametresi ile tanımlanan t_{10} 'un limit (maksimum) değerine ulaşılmaktadır. Bu değer belirli bir enerji seviyesinden sonra daha fazla boyut küçültme sağlanamayacağına bir göstergesidir. $E_{cs}-t_{10}$ eğrisinin eğimi Eşitlik 5 ile tanımlanmaktadır (Man,2000).

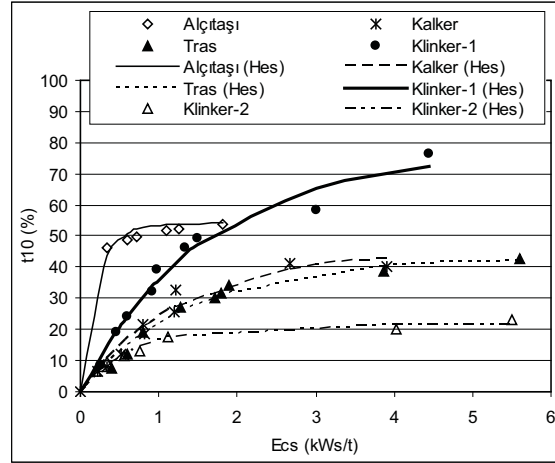
$$\frac{d_{t10}}{\bar{\epsilon}_s} = A.b \quad (5)$$

A.b değeri sertlik indeksi olarak anılmakta ve özgül ufalanma enerjisinin sıfır olması durumunda $E_{cs}-t_{10}$ eğrisinin eğimini tanımlamaktadır. A ve b değerleri doğrusal olmayan regresyon tekniği ile tahmin edilmektedir.

Klinker-1 ve klinker-2 numuneleri ile çimento katkılarının konvansiyonel yöntemle oluşturulan $E_{cs}-t_{10}$ ilişkileri karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da sunulmaktadır.

Şekil 10'dan izleneceği üzere, klinker, kalker ve tras ile benzer enerji düzeylerinde alçıtaşı yüksek oranda ufalanmaktadır. 1kWs/t'luk enerji düzeyinin üzerinde alçıtaşının t_{10} incelik indeksi değeri enerji seviyesinden bağımsız hale gelmiş ve limit değerine ulaşmıştır. Farklı tesislerden temin edilen klinkerlerin kırılma davranımları birbirinden oldukça farklıdır.

Sabit enerji tüketiminde (kWs/ton), klinker-1 ve klinker-2 numunelerinin t_{10} değerleri arasında ciddi bir farkın olduğu görülmektedir. Klinkerlerin kırılma davranımındaki bu fark mineralojik bileşim ve mikroyapıyı doğrudan etkileyen fırın tipi ve koşullarına, soğutucu tipi ve koşullarına bağlanabilir (Altun, 1998; Altun, 1999; Altun ve Ölmez, 2001).



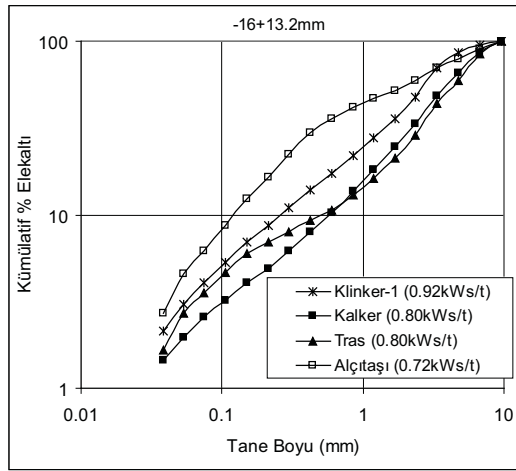
Şekil 10. Test numunelerinin $E_{cs}-t_{10}$ ilişkileri.

DeneySEL olarak belirlenen $E_{cs}-t_{10}$ ilişkilerinin Eşitlik 4'de verilen boyut küçültme modeline oturtulmasıyla tahmin edilen A ve b model parametre değerleri ile hesaplanan A.b indeksi Çizelge 2'de verilmektedir. Bu bağlamda, numunelerin darbe kırılmasına karşı gösterdikleri direnç A.b sertlik indeksi parametresi ile karakterize edilmiştir. A.b parametre değerinin yükselmesi malzemenin kırılmaya karşı direncinin azaldığını, daha kolay ufalanabilir bir yapıda olduğunu göstermektedir. Farklı boyut fraksiyonlarının ufalanabilirlik özelliklerini Çizelge 2'de verilen sertlik indeksi A.b değerine indirgeyerek bir karşılaştırma yapıldığında, alçıtaşının klinker, kalker ve trasa oranla daha kolay ufalanır bir yapıda olduğu, tras ve kalkerin ise ufalanmaya karşı gösterdiği direncin aynı olduğu söylenebilir. Fakat klinker ve katkı numuneleri için aynı tane fraksiyonunun benzer enerji seviyelerinden kırılmasıyla elde edilen kırılma dağılımları incelendiğinde, tras ve kalker farklı kırılma dağılımı sergileyebilmektedir (Şekil 11). Literatürde A.b sertlik indeksi ile Bond iş indeksi değeri (W_i) arasındaki korelasyon incelenmiş ve iş indeksi değerleri 7-27 kWs/t aralığında değişen 47 farklı cevher tipi üzerinde

yapılan testler sonucunda ortaya konmuştur. Bulgular, A.b değerinin artmasıyla cevherin iş indeksi değerinin düştüğünü göstermektedir (Napier Munn vd., 1996).

Çizelge 2. Kırılma Davranımının $E_{cs}-t_{10}$ Modeline Uyumu ve Geri Hesaplanan Tane Boyutundan Bağımsız Kırılma Parametreleri

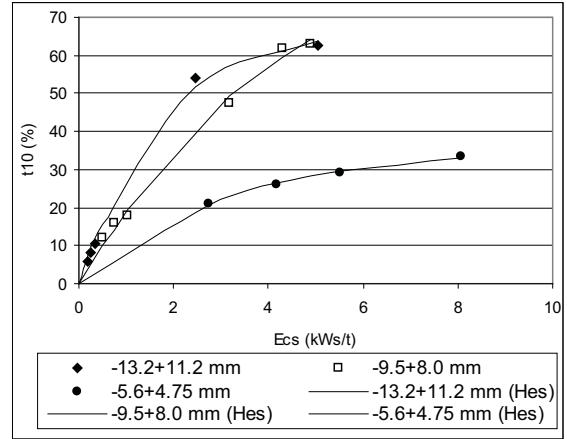
Bileşen	A ($t_{10\text{maksimum}}$)	b	A.b	R ²
Klinker-1	76.94	0.64	48.91	0.98
Klinker-2	21.48	1.49	32.01	0.97
Kalker	44.70	0.78	34.81	0.97
Tras	42.63	0.77	32.68	0.96
Alçıtaşı	51.24	6.36	325.91	1.00



Şekil 11. Klinker ve katkı numunelerinin fraksiyonel kırılma dağılımları.

Klinkerin tane boyuna bağlı kırılma davranımını ortayakoyabilmek amacıyla klinker-3 numunesinin üç farklı fraksiyonu benzer enerji seviyelerinde kırılmıştır. Her boyut fraksiyonunun kendi içerisinde $E_{cs}-t_{10}$ modeline uyumu incelenmiş ve Şekil 12'de sunulmuştur. Görüleceği üzere farklı boylar benzer enerji tüketiminde farklı kırılma davranımı sergilemektedir. Bu durum klinkerin boya bağlı kırıldığını göstermektedir. 4 kWs/ton'luk enerji düzeyinde -13.2+11.2mm ve -9.5+8.0mm boyut aralığındaki taneler için boyut küçültme limitine ulaşıldığı t_{10} değerlerinin değişiminden izlenebilmektedir. Tane boyuna bağlı kırılma sadece klinkere özgü değildir. Literatürde, kırılma dağılımı fonksiyonunun farklı

cevherler için tane boyu ve yükleme enerjisi seviyesine bağlı olarak değişimini ortaya koyan ve bu bazda enerji-boyut küçültme modellerinin geliştirildiği çalışmalara rastlanmaktadır (Narayanan, 1986; Zang, 1992).



Şekil 12. Klinker-3 örneğinin farklı boyut fraksiyonlarının $E_{cs}-t_{10}$ ilişkileri.

Klinker-3 örneği için gösterilen farklı boyların kırılma davranımındaki farklılık, A ve b model parametre değerlerinin fraksiyonel bazda değişim göstermesine neden olmaktadır. Tahmin edilen $E_{cs}-t_{10}$ model parametre değerleri Çizelge 3'de sunulmaktadır. Aynı tesisin klinkerinde fraksiyonel bazda gözlemlenen kırılma davranımındaki değişim tanelerin öğütülebilirliğini etkileyen mineralojik bileşim ve mikroyapı özellikleri ile ilişkilidir.

Çizelge 3. Klinker-3 Örneği Kırılma Davranımının Tane Boyu Bazında $E_{cs}-t_{10}$ Modeline Uyumu ve Geri Hesaplanan Kırılma Parametreleri

Fraksiyon (mm)	A ($t_{10\text{maksimum}}$)	b	A.b	R ²
-13.2+11.2	67.08	0.59	39.37	1.00
-9.5+8.0	95.02	0.23	21.75	0.99
-5.6+4.75	36.04	0.31	11.27	1.00

3.2. Tek Parametrelili t-Aile Eğrisi Yaklaşımı ile Kırılma Dağılımı Fonksiyonlarının Belirlenmesi

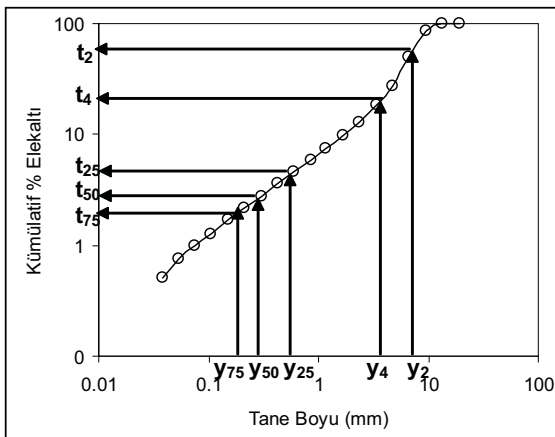
Ekipmanların matematiksel modellerinin

oluşturulabilmesi için, kırılma fonksiyonunun model yapısında tek bir dağılım ile ifade edilmesi gerekmektedir. Narayanan ve Whiten (1988) malzemelerin karakteristik kırılma dağılımlarının belirlenebileceği, tek parametrelili t-aile eğrisi yaklaşımını geliştirmiştir. Yaklaşımına göre, test edilen tane boyunun geometrik ortalaması orjinal (nominal) boy olarak adlandırılmakta ve bu boyun 1/2, 1/4, 1/10, 1/25, 1/50, 1/75'inden geçen kümülatif malzeme yüzdeleri sırasıyla t_2 , t_4 , t_{10} , t_{25} , t_{50} , t_{75} şeklinde bir seri "t" parametresi ile tanımlanmaktadır. Yaklaşım farklı minerallerin kırılma fonksiyonlarının belirlenmesinde uygulama alanı bulmuştur (Narayanan ve Whiten, 1988; Man, 2000).

Bu çalışmada, kırılmış malzemenin ürün boyut dağılımlarından t_n dağılım parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan tane boyları Çizelge 4'de verilmektedir. "y" nominal tane boyutunu nitelemektedir. Nominal tane boyu 14.53mm olan bir fraksiyonunun belirli bir enerji seviyesinden kırılması sonucu oluşacak tipik bir boyut dağılımından t_n dağılım parametrelerinin belirlenmesi Şekil 13'de gösterilmektedir.

Çizelge 4. t_n Dağılım Parametrelerinin Belirlenmesinde Kullanılan Tane Boyları (mm)

y	y_{75}	y_{50}	y_{25}	y_{10}	y_4	y_2
14.53	0.19	0.29	0.58	1.45	3.63	7.27
12.16	0.16	0.24	0.49	1.22	3.04	6.08
8.72	0.12	0.17	0.35	0.87	2.18	4.36



Şekil 13. Kırılmış ürün tane boyu dağılımlarından t_n parametrelerinin belirlenmesi.

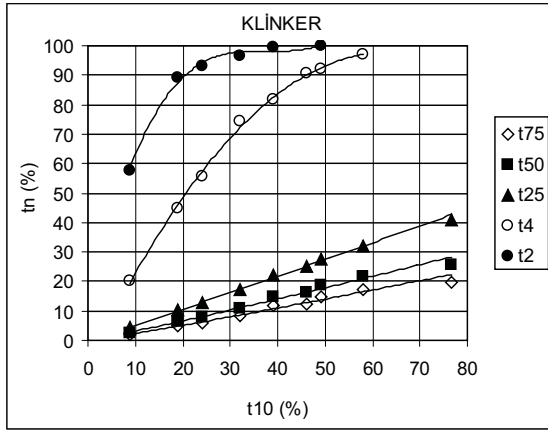
Çizelge 3'de verilen A ve b model parametreleri kullanılarak farklı özgül ufalanma enerjisi seviyeleri için t_{10} değerleri hesaplanabilmektedir. Çizelge 5'de CEM II/B Portland Kompoze Çimento üretimi yapan öğütme devresinin (Tesis A) ana beslemesini oluşturan klinker-1, kalker, tras ve alçıtaşı örneklerinin hesaplanan t_{10} değerleri verilmektedir.

Çizelge 5. $E_{cs}-t_{10}$ Modeli Kullanılarak Geri Hesaplanan İncelik İndeksi (t_{10}) Değerleri

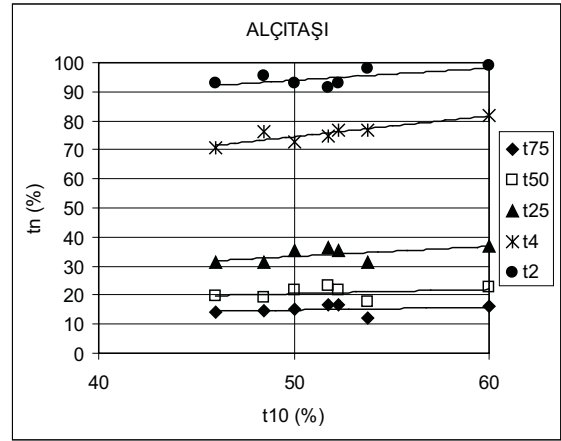
Bileşen	0.5kWs/t	1kWs/t	1.5kWs/t	2kWs/t
	t_{10}	t_{10}	t_{10}	t_{10}
Klinker-1	21.07	36.37	47.48	55.55
Kalker	14.44	24.21	30.83	35.31
Tras	13.57	22.83	29.13	33.43
Alçıtaşı	49.32	53.17	53.47	53.50

Değirmen beslemesi için enerji seviyesine bağlı olarak kırılma fonksiyonları Çizelge 5'de verilen t_{10} değerlerine göre oluşturulabilmektedir. Farklı enerji seviyelerinden kırılan boyut fraksiyonlarının tane boyu dağılımı grafiklerinden her enerji seviyesi için belirlenen t_{10} değerlerinin diğer t_n ($n = 2, 4, 25, 50, 75$) dağılım parametrelerine karşı grafiğe geçirilmesi durumunda t-aile eğrileri elde edilmektedir. Eğri ailesinde herhangi bir t_{10} değerinden eğrilere çıkılacak her dik çizgi kümülatif % elekalıtı olarak tanımlanan tam bir boyut dağılımını vermektedir. Bu durumda tek bir parametre t_{10} yardımıyla malzemenin kırılma dağılımı belirlenebilmektedir. $E_{cs}-t_{10}$ ilişkisi ile t-aile eğrilerinin birlikte kullanımı ile oluşturulan yeni boyut dağılımı malzemeye özgü kırılma dağılımı fonksiyonunu tek bir dağılım ile karakterize etmektedir. Bu bağlamda klinker-1, kalker, tras ve alçıtaşı numuneleri için oluşturulan t-aile eğrileri Şekil 14, 15, 16 ve 17'de sunulmaktadır.

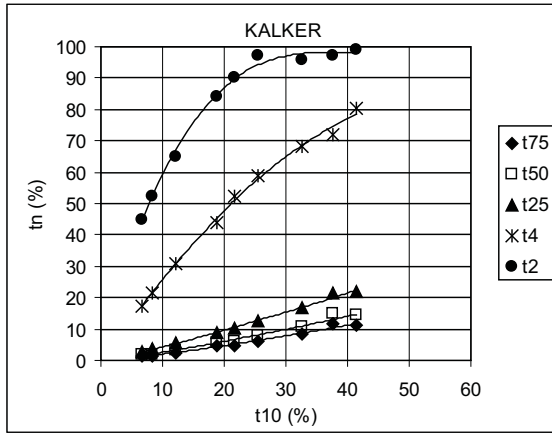
t-aile eğrilerinde belirli bir t_{10} değeri için t_{25} , t_{50} ve t_{75} değerleri kırılma dağılımı fonksiyonunun ince boyut, t_4 ve t_2 değerleri fonksiyonun iri boyut ucunu karakterize etmektedir. Şekil 17'de gösterilen alçıtaşı t-aile eğrileri diğer bileşenlerin karakteristik eğrilerinden farklılık göstermektedir. Alçıtaşı için oluşturulan $t_{10}-t_n$ ilişkileri, farklı tane fraksiyonlarının kırılması sonucunda ortalama sabit bir boyut dağılımının elde edileceğini göstermektedir. $t_{10}-t_n$ ilişkilerinden hesaplanan tek



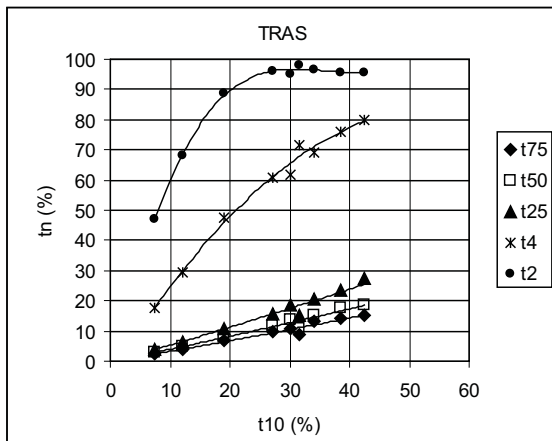
Şekil 14. Klinker beslemesi t-aile eğrileri.



Şekil 17. Alçıtaşı beslemesi t-aile eğrileri.



Şekil 15. Kalker beslemesi t-aile eğrileri.



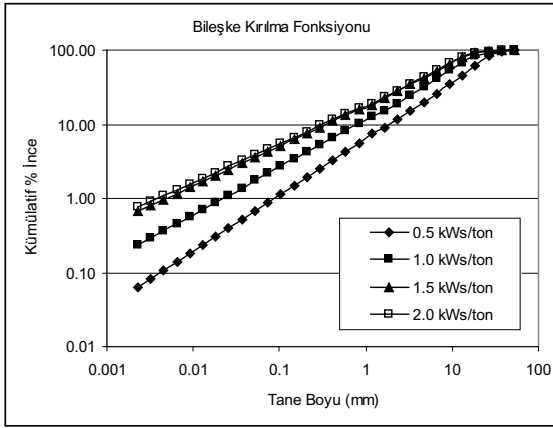
Şekil 16. Tras beslemesi t-aile eğrileri.

tane kırılma fonksiyonları değirmen beslemesindeki en iri tane boyuna göre normalize edilebilmektedir. Bu durumda malzemenin kırıldıktan sonra kendinden alt boylara dağılımının başlangıç tane boyutundan bağımsız olduğu varsayımı yapılmaktadır.

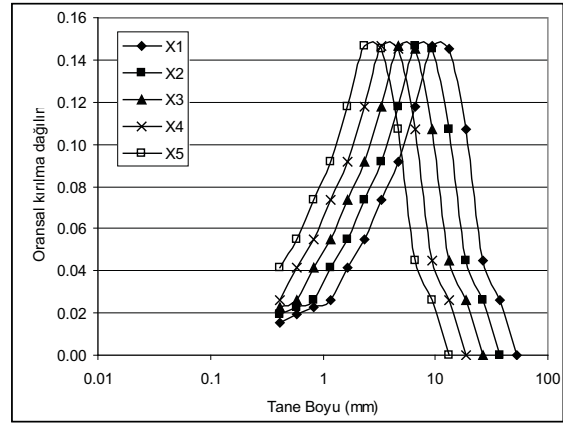
CEM II/B Portland Kompoze Çimento üretimi koşulunda olduğu gibi birden fazla bileşenin öğütölmek üzere beslendiği değirmenlerin matematiksel model yapılarının oluşturulabilmesi için, her bileşenin karakteristik kırılma dağılımının model yapısında tek bir dağılım ile ifade edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda toplam değirmen beslemesinin kırılma fonksiyonu, klinker, kalker, tras ve alçıtaşı için hesaplanan kırılma dağılımlarının, bileşenlerin beslemedeki yüzdelere göre oranlanmasıyla belirlenebilir. Değirmendeki farklı enerji düzeyleri için A tesisi değirmen beslemesinin 53mm'den 2.3µm'ye kadar belirlenen kırılma dağılımları Şekil 18'de verilmektedir. 850µm'nin altındaki tane boylarının kırılma dağılımları doğrusal regresyonla belirlenmiştir. Değirmen beslemeleri için kontrol odasından kaydedilen tonaj (t/s) ve ağırlıkça % oranları Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6. Tonaj Akışları ve Ağırlıkça % Oranları.

Bileşen	ton/saat	%
Klinker-1	29.03	60.37
Tras	11.53	23.98
Kalker	5.23	10.88
Alçıtaşı	2.3	4.78



Şekil 18. Değirmen toplam beslemesi kırılma dağılımı fonksiyonunun enerji seviyesi ile değişimi.



Şekil 20. Kırılma dağılım fonksiyonunun kırılma matrisi içerisinde tane boyu ile değişimi.

Bilyalı değirmenin mükemmel karışım modeli bazında matematiksel modelinin oluşturulmasında kullanılmak üzere on boyut grubu için oluşturulan 10x10'luk tipik bir üçgen kırılma dağılımı çevrim matrisi Şekil 19'da gösterilmiştir. Kırılma dağılım matrisinde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ değirmen beslemesindeki en iriden en inceye doğru farklı tane boylarını ifade etmektedir. Matrisde tanımlanan oransal malzeme dağılımının tane boyu ile değişimi ilk beş boyut fraksiyonu için grafiksel olarak Şekil 20'de verilmektedir. İzlenebileceği üzere, yaklaşımda tane boyu incelince kırılma oranının sabit kaldığı kabullenmesi yapılmaktadır.

Tane boyu (mm)	f_n	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
53	$X_{1,1}$	0.000									
37.48	$X_{2,1}$	0.026	0.000								
26.5	$X_{3,1}$	0.045	0.026	0.000							
18.74	$X_{4,1}$	0.107	0.045	0.026	0.000						
13.25	$X_{5,1}$	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000					
9.37	$X_{6,1}$	0.147	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000				
6.63	$X_{7,1}$	0.118	0.147	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000			
4.68	$X_{8,1}$	0.092	0.118	0.147	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000		
3.31	$X_{9,1}$	0.074	0.092	0.118	0.147	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000	
2.34	$X_{10,1}$	0.055	0.074	0.092	0.118	0.147	0.145	0.107	0.045	0.026	0.000

Şekil 19. Klinker-1, kalker, tras ve alçıtaşı örneklerinin birleştirilmiş kırılma dağılım fonksiyonu çevrim matrisi X_n =Ürün dağılım vektörleri ($n=1,2,3\dots 15$).

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özgül ufalanma enerjisi ve ürün inceliği arasındaki ilişkiler kullanılarak klinker ve çimento katkılarının tek tane darbe kırılma

karakteristikleri incelenmiştir. Klinker, kalker ve trasın tane boyutundan bağımsız hale getirilmiş ürün dağılımlarının 1 kW/ton'un üzerindeki enerji seviyelerinde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Alçıtaşının ise enerji seviyesinden bağımsız kırıldığı ortaya konmuştur.

Klinkerin tek tane kırılma davranımının tane boyuna bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bu durumda klinkerin boya bağımlı kırılma davranımının daha fazla veri setiyle desteklenmesi, özgül ufalanma enerjisi, tane boyu ve kırılma indeksi (t_{10}) parametrelerinin ilişkilendirileceği bir modelin ortaya konması gerekmektedir.

Her tane boyunun aynı şekilde kırıldığı kabulü bilyalı değirmen modellemesinde araştırmacılara büyük bir kolaylık sağlamaktadır fakat malzemenin tane boyuna bağlı olarak kırılma dağılımındaki değişimlerin etkisinin öğütme model parametrelerine daha iyi yansıtılabilmesi amacıyla bilyalı değirmen model yapısında tane boyuna bağımlı bir kırılma matrisinin tanımlanması gerekmektedir. Bu durumda ise öğütme modeli çok daha karmaşık bir yapıya sahip olacaktır.

Bir çimento öğütme değirmeninde 9 mm'den iri tanelerin değirmenin ilk iki metresinde kırılıp yok olması, değirmen içerisinde öncelikli olarak 9mm'den daha ince tanelerin kırılma davranımlarının bilinmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle kapalı devre öğütme sistemlerinde değirmen beslemesinin incelendiği

düşünülecek olursa, ince tanelerin kırılma karakteristiğinin bilinmesi önem kazanmaktadır. Bu bağlamda Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde 9mm'den ince tanelerin yatak içerisinde kırılma davranımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar ağırlık düşürme düzeneği kullanılarak yürütülmektedir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, MISAG 190 no'lu proje kapsamında çalışmayı destekleyen Türkiye Bilimsel Araştırmalar Kurumu'na ve Prof.Dr.Ş.Levent Ergün'e teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Altun, A. İ., 1998; "Klinker Kalite Kontrolunda Mikroskopik Kriterler", Çimento ve Beton Dünyası, **2(16)**, 22-32.

Altun, A. İ., 1999; "Fırın Sistemlerinin Klinkerlerin Mikroyapılarına Etkileri", Çimento ve Beton Dünyası, **3(19)**, 33-41.

Altun, A. İ. ve Ölmez, N., 2001; "Comparative Investigations of Microstructure and Grindability of Cement Clinker", The Journal of Ore Dressing, (6), 1-8.

Arbiter, N., Harris C.C. and Stamboltzis, G.A., 1969; "Single Fracture of Spheres", Trans. S.E.M/AIME, **244**, 118-133.

Asim, M.E., 1984; "Investigations of Cement Clinker Grindability Using Drop-Weight Tests and its Relation to Tube Mill Performance", Zement-Kalk-Gips, No.11, 577-584.

Austin, L.G., Klimpel R.R., Luckie P.T., 1984; "Process Engineering of Size Reduction: Ball Milling", AIME Publ., NY.

Andersen, 1988; "Development of a cone crusher model", MSc. Thesis, University of Queensland (JKMRC)

Banini, 2000; "An integrated description of rock breakage in comminution machines", PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC), Australia

Bourgeois, F., King R.P., and Herbst J.A., 1992; "Low-Impact-Energy Single Particle Fracture", Kawatra Edition, AIME, Ch 8, 99-108.

Broadbent, S.R., Callcott T.G., 1956; "A Matrix of Processes Involving Particle Assemblies", Phil. Trans. R. Soc. Lond., Ser., A, **249**: 99-123.

Brown, G.J., 1997; "A Fractal Description of the Progeny of Double Impact Single Particle Breakage", Technical Note, Minerals Engineering, **10(2)**, 229-235.

Epstein, B., 1948; "Logarithmico-Normal Distribution in Breakage of Solids", Industrial and Engineering Chemistry, **40(12)**, 2289-2291.

Fahernwald, A.W., Newton J., and Herkernhoff E., 1938; "Velocity of Hit in Rock Crushing", Eng. Min. J., 138,45-48 p; 139, 43-46.

Fairs, G.L., 1954; "A Method of Predicting the Performance of Commercial Mills in the Fine Grinding of Brittle Materials", Trans Inst Min. Metall, **63**, 211-240.

Gardner, R.P., and Austin L.G., 1962; "A Chemical Engineering Treatment of Batch Grinding", In: H.Rumpf and D. Behrens (Editors), Proceedings, 1st European Symp. Zerkeimern. Verlag Chemie, Weinheim, 217-247.

Gaudin, A.M., and Hukki R.T., 1946; "Principles of Comminution", Trans, SME/AIME, **169**, 67-87.

Genç, Ö., 2002; "Klinker ve Çimento Katkılarının Kırılma Dağılım Fonksiyonlarının İncelenmesi", Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Gross, J., 1938; "Crushing and Grinding", US Bureau of Mines Bulletin, **402**, 1-148.

Herbst, J.A, Fuerstenau D.W., 1968; "The Zero Order Production of Fines in Comminution and its Implications in Simulation", Trans. AIME., **241**, 538-549.

Herbst J.A., Grandy, G.A. and Fuerstenau D.W., 1972; "Population Batch Models for Design of Continous Grinding Mills", Proceedings of Tenth Inter. Miner. Process. Congress. London, 23-45.

Herbst, J.A, Fuerstenau D.W., 1980; "Scale-Up

- Procedure for Continuous Grinding Mill Design Using Population Balance Models”, *International Journal of Mineral Processing*, **7(1)**, 1-31.
- Höffler, J.A. and Herbst J.A., 1990; “Ball Mill Modelling Through Microscale Fragmentation Studies: fully Monitored Particle Bed Comminution Versus Single Particle Impact Tests”, *The 7th European Symposium on Comminution, Ljubjana, Yugoslavia*, 381-397.
- Kanda, Y., Abe Y., Hosoya T., Honma T., 1989; “A Consideration of Ultrafine Grinding Based on Experimental Result of Single Particle Crushing”, *Powder Technology*, **58(2)**, 137-143.
- Kelsall, D.F., and Reid K.J., 1965; “The Derivation of a Mathematical Model for Breakage in a Small Continuous Wet Ball mill”, *Proc. A.I. Ch. E./I. Chem.E. Joint Meeting, London, June, Section 4*, 14-20.
- Krogh S.R., 1979; “Determination of crushing and grinding characteristics based on testing of single particles”, *Trans. S.M.E/A.I.M.E.*, **266**, 1957-1962
- Leung K., 1987; “An energy based ore specific model for autogenous and semi-autogenous grinding”, PhD Thesis, University of Queensland (JKMRC).
- Lynch, A.J., 1977; “Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimization, Design and Control”, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 1-65.
- Man, Y.T., 2000; “A Model-based Scale-up Procedure for Wet, Overflow Ball Mills”, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Department of Mining, Minerals and Materials Engineering, The University of Queensland, February.
- Man, Y.T., 2001; “Model-Based Procedure for Scale-Up of Wet, Overflow Ball Mills Part I: Outline of the Methodology”, *Minerals Engineering*, **14(10)**, 1237-1246.
- Napier-Munn, T.J.; Morrell, S.; Morrison, R.D.; Kojovic, T. 1996; “Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimization”, JK MRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing 2, Ed. Napier-Munn, T.J.
- Narayanan S.S., Whiten W.J., 1983; “Breakage Characteristics for Ores for Ball Mill Modelling”, *Australias Inst Min Metall*, No 286, June, 31-39.
- Narayanan, S.S., 1985; “Development of a Laboratory Single Particle Breakage Technique and its Application to Ball Mill Modelling and Scale-up”, PhD Thesis, University of Queensland, Australia.
- Narayanan, S.S., 1986; “Single Particle Breakage Tests: A review of Principles and Applications to Comminution Modelling”, *Bull. Proc. Australas. Inst. Min. Metall.*, **291(4)**, 49-58.
- Narayanan S.S. and Whiten W.J., 1988; “Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application to ball mill scale-up”, *Trans. Inst. Min Met*, **97**, C115-C124
- Pauw, O.G., Maré M.S., 1988; “The Determination of Optimum Impact-Breakage Routes for an Ore”, *Powder Technology*, **54**, 3-13.
- Piret, E.L., 1953; “Fundamental Aspects of Grinding”, *Chem Eng Prog*, **49**, 56-63.
- Potapov, A.V. and Campbell, C.S., 1994; “Computer Simulation of Impact-induced Particle Breakage”, *Powder Technology*, **81**, 207-216.
- Rumpf, H., 1973; “Physical Aspects of Comminution and New Formulation of a Law of Comminution”, *Powder Technology*, **7**, 145-159.
- Schöenert, K., 1972; “Role of Fracture Physics in Understanding Comminution Phenomena” *Transactions of Society of Mining Engineers AIME*, **252**, 21-26.
- Schöenert, K., 1991; “Advances in Comminution Fundamentals and Impacts on Technology”, *Aufbereit.-tech.*, **32**, 487-494.
- Tavares, L.M., King R.P., 1998; “Single-particle Fracture Under Impact Loading”, *International Journal of Mineral Processing*, **54**, 1-28.
- Tavares, L.M., 1999; “Energy Absorbed in Breakage of Single Particles in Drop-Weight Testing”, *Minerals Engineering*, **12(1)**, 43-50.
- Weedon, D.M., Wilson F., 2000; “Modelling

Iron Ore Degradation Using a Twin Pendulum Breakage Device”, *Int. J. Miner. Process.*, **59**, 195-213.

Weichert, R., 1990; “Fracture Physics in Comminution”, *Proc. 7th Eur. Symp. Comminution, Ljubljana*, **1**, 3-20.

Weedon, D.M., 2001; “A Perfect Matrix Model for Ball Mills”, *Minerals Engineering*, **14(10)**, 1225-1236.

Whiten, W.J., 1972; “A model for Simulating Crushing Plants”, *J.S.Afr. Inst. Min. Metall.*, **72**, 257-264.

Yashima, S., Saito F. And Horita H., 1981; “Single Particle Testing by Double Pendulum Type Impact Testing Apparatus”, *Kagaku Kogaku Ronbunshui*, **7**, 83-89.

Yashima, S., Saito F., Masuko Y., 1982; “Single Fracture of Irregular Shaped Particles Under Impact Loading”, *Kagaku Kogaku Ronbunshui*, **8**, 710-716.

Yashima, S., Kanda Y., Sano S., 1987; “Relationships between Particle Size and Fracture Energy or Impact Velocity Required to Fracture as Estimated from Single Particle Crushing”, *Powder Technology*, **51**, 277-282.

Zeleny, R.A., and Piret E.L., 1972; “Dissipation of Energy in Single Particle Crushing”, *I and EC Process Design and Dev*, **1**, 37-41.

Zhang, Y.M., 1992; “Simulation of Comminution and Classification in Cement Manufacture”, *Ph.D.Thesis, South University B.E. (Central-South University of Technology, China)*, 252.