

# MADENCİLİK

TMMOB MADEN MÜHENDİSLERİ ODASI DERGİSİ  
THE JOURNAL OF THE CHAMBER OF MINING ENGINEERS OF TURKEY

MART  
MARCH  
2010

CİLT  
VOLUME  
49

SAYI  
NUMBER  
1

## İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Doğan KARAKUŞ, Gürcan KONAK,  
Ahmet Hakan ONUR

**3** Basamak Patlatması Sonucu Oluşan Yığın Boyut Dağılımının Ampirik Modeller ile Tahmini ve Görüntü Analizi Yöntemleri ile Karşılaştırılması  
*Estimation of Benh Blasting-Induced Bulk Size Distribution by Empirical Models and Its Comparison with Image Analysis Methods*

Ali SARIİŞİK, Gencay SARIİŞİK

**17** Doğaltaş Nihai Ürünlerinin Kayma Açısını Etkileyen Parametrelerin İstatistiksel Analizi  
*Statistical Analysis of Final Product Natural Stone Parameters Affecting Slip Angle*

Selçuk SAMANLI

**31** Çatalağzı Termik Santral Katı Fosil Yakıtı Kırılma Davranışının Karıştırmalı Değirmen ve Bilyalı Değirmende Karşılaştırılması  
*Comparison of the Breakage Behavior of Catalağzı Thermal Power Plant Solid Fossil Fuel in Stirred Mill and Ball Mill*

### Teknik Not / Technical Note

Murat KADEMLİ, Derya KALYON,  
Özcan Yıldırım GÜLSOY

**45** Linyitlerin Kuru Zenginleştirmesinde Tabla Türü Havalı Ayırıcının İşlem Değişkenlerinin Etkisinin İncelenmesi  
*Investigation of the Effect of Operational Parameters of Table-Type Air Separator in Dry Concentration of Lignite*

MADENCİLİK dergisi yazı dizini ve özetlerinin yer aldığı veri tabanları / INDEXED in  
*IMM Abstracts, GeoRef, Aluminium Industry Abstracts, Cambridge Scientific Abstracts, PASCAL, Chemical Abstracts, ENCOMPLIT, ENCOMPLIT2, ENERGY, Compendex*

### Abone Koşulları:

Yıllık abone bedeli 100,00 TL'dir.

### Subscription

Annual subscription rate is 100,00 TL. All subscription inquiries should be made to the correspondence address.

### Banka Hesap No:

Türkiye İş Bankası Meşrutiyet Şubesi: 8120  
T.C. Ziraat Bankası Kızılay Şb. 39009031-5001  
Posta Çeki Hesap No: 86665

ISSN: 0024-9416

## BASAMAK PATLATMASI SONUCU OLUŞAN YIGIN BOYUT DAGILIMININ AMPIRİK MODELLER İLE TAHMİNİ VE GÖRÜNTÜ ANALİZİ YÖNTEMLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Estimation of Bench Blasting-Induced Bulk Size Distribution by Empirical Models and Its  
Comparison with Image Analysis Methods

Doğan Karakuş (\*)  
Gürcan Konak (\*\*)  
Ahmet Hakan Onur(\*\*\*)

### ÖZET

Açık maden işletmelerinde basamaklar şeklinde üretim emniyetli ve ekonomik bir yöntem olarak başarı ile uygulanmaktadır. Basamaklı yapıların oluşturulmasında ve üretimin gerçekleştirilmesinde kaçınılmaz olarak delme-patlatma operasyonları yapılmaktadır. Kaya kütlelerinden cevher zenginleştirme öncesi ince boyutlu malzeme üretimine kadar boyut küçültme göz önüne alındığında basamak patlatmaları boyut küçültmenin ilk aşaması olarak diğer işlemlerin verimini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle basamak patlatmalarında boyut dağılımının denetlenebilmesi ardışık işlemlerin verimliliği açısından önemlidir. Basamak patlatmalarından boyut dağılımının belirlenmesi hem kontrol edilen değişkenler (patlatma tasarım parametreleri) hem de kontrol edilemeyen değişkenler (kaya kütlesi özellikleri) fazlalığı nedeniyle oldukça güçtür. Yığın boyut dağılımının belirlenmesi için önerilen modellerden Kuz-Ram ve KCO modeli bu makalede tartışılmıştır. Ayrıca boyut dağılımının belirlenmesi için kullanılan görüntü işleme programlarından olan Split Desktop programı ile WipFrag programı kullanılarak boyut dağılımı belirlenmiş, boyut dağılım tahmin modelleri arasında karşılaştırma yapılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Basamak Patlatması, Boyut Dağılımı, Kuz-Ram, KCO Modeli, Görüntü Analizi

### ABSTRACT

Production in the shape of benches in open pit mines have long been applied successfully as a safe and economical method. Drilling and blasting operations are carried out in order to form bench structures and to achieve production. When comminution process starting from the rock mass and going on until the acquirement of fine-grained material prior to mineral processing is taken into consideration, bench blasts directly influence the efficiency of other operations as the initial phase of comminution. For this reason, the detectability of size distribution in bench blasts are crucial from the aspect of consecutive operations. The determination of size distribution in bench blasts is rather difficult due to the abundance of both the controllable variables (blast design parameters) and uncontrollable variables (rock mass properties). Among the proposed models for the determination of heap size distribution, Kuz-Ram and KCO models have been discussed in this paper. Besides, Split Desktop program, one of the image processing programs, and also WipFrag program have been employed for the determination of size distribution and a comparison has been made between estimation models of size distribution.

**Keywords:** Bench Blasting, Fragmentation, Kuz-Ram, KCO Model, Image Analysis

---

(\*) Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Fak. Maden Müh. Bölümü 35160 Buca/iZMiR, dogan.karakus@deu.edu.tr  
(\*\*) Doç. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fak., Maden Müh. Bölümü 35160 Buca/iZMiR  
(\*\*\*) Prof. Dr. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fak., Maden Müh. Bölümü 35160 Buca/iZMiR

## 1. GİRİŞ

18. yüzyılda Alfred Nobel tarafından keşfedildiğinden beri patlayıcılar kayaç kazısında hala en ekonomik ve etkili yöntem olarak açık ocak madenciliğinde kullanılmaktadır. Keşfinden günümüze patlayıcı maddeler teknolojisi de sürekli gelişmiş ve sayısız araştırmalar yapılmıştır. Bu süreçte araştırmacıların yoğunlaştığı konulardan birisi de patiatma veriminin değerlendirilmesinde bir ölçüt olan patiatma sonrası oluşan yığının boyutdağılımının belirlenmesidir. Yığın boyutdağılımı kendi başına patiatma verimi ile ilgili sayısal bilgiler içerebildiği gibi patiatma sonrası operasyonların verimliliği açısından da önemini korumaktadır.

iyi tasarlanmış bir patiatma ile üniform dağılmış, yükleyicilerle verimli bir şekilde yüklenebilen, kabarma faktörünün düşük, azami hacimli bir şekilde nakliye araçlarının nakledebildiği ve kırıcının uygun değer şartlarda kırma sağlayabildiği malzeme elde etmek mümkündür. ideal şartlarda, süreksizliklerin olmadığı, kayaç özelliklerinin aynı olduğu bir kaya ortamında oluşturulan delik geometrisi ve kullanılan patlayıcı miktarı ile oluşabilecek boyut dağılımı çok az bir hata ile modellenenir. Ancak basamak patialmalarında kontrol edilebilir ve kontrol edilemeyen (kayacın fiziksel ve mekanik özellikleri, şevin süreksizlik özellikleri vb.) bir çok değişken olması nedeniyle görgül yaklaşımların dışında boyut dağılımının tahmin edilebildiği gerçekçi bir model geliştirilememiştir. Geliştirilen görgül yaklaşımlarda ise basamak patialmalarının ana değişkenleri (özellikler şarj, dilim kalınlığı, basamak geometrisi, kaya kütlesi özellikleri vb.) ile ortalama boyut arasındaki ilişki çıkış noktasını oluşturmuştur.

Gerçekçi parça boyut dağılımının belirlenmesi ancak tüm yığının elekanalizine tabi tutulması ile mümkün olabilir. üretim ölçeğinde bir patiatma yığınının bu şekilde elekanalizine tabi tutulması pratikte uygulanması zor bir yöntemdir. Bu nedenle yığının boyut dağılımının belirlenmesinde görgül yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar yığının bir bölümünün veya tamamının dağılımının belirlenmesi için farklı metotlar ile tanımlanması esasına dayanır. Bu yöntemlerin başında subjektif bir değerlendirme olan görsel-gözlensel yöntem gelmektedir. Uzman kişilerce yapılan bu yöntemde, herhangi bir sayısal veri üretilmemekte, patiatma verimi sözel olarak

derecelendirilmektedir. Bir başka yöntem ise yükleyici makinelerin yükleyemediği büyüklükteki patarların sayılarak büyüklüklerinin ölçülmesi yöntemidir. Patiatma verimi açısından biryaklaşım verebilen patar atımları patlayıcı tüketimleri, uygulamada boyut dağılımının belirlenmesinde karşılanan güçlükler nedeniyle üretilen dalaylı çözüm yöntemlerinden birisidir. Aynı yaklaşımla yükleyici makinelerin yükleme performansı veya primer kırıcıların kırma performansı da patiatma veriminin belirlenmesinde kullanılan dalaylı metotlardandır.

Konuyla ilgili bütün yığının elekanalizi yapılması haricinde, gerçeğe en yakın veriler, kabul edilebilir hata payı sınırları içinde, görüntü işleme metotları ile elde edilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte çeşitli aşamalardan geçen bu yöntemin ilk uygulamalarında analog görüntüler üzerinde karele yöntemi ile tanelerin elle sayılması ile yapılmıştır. Sonraları görüntü alma teknolojisinin gelişmesine paralel olarak görüntülerin analiz edilmesi ve sayısal verilerin değerlendirilmesi için yazılımlar geliştirilmiş, önceleri yarı otomatik yapılan bu işlemler günümüzde literatürde kabul görmüş bir işlem haline gelmiş ticari yazılımlar geliştirilerek uygulayıcıların hizmetine sunulmuştur.

Bu makalede basamak patiatması boyut dağılım önemi ve tahmini modelleri tartışılarak görüntü analizi yöntemiyle karşılaştırılması değerlendirilmesi yapılmıştır.

## 2. BASAMAK PATLATMASI SONUCU OLUŞAN BOYUT DAĞILIMININ ÖNEMİ

Günümüz açık maden işletmelerinde basamaklar şeklinde üretim ekonomikliğini ve verimliliğini tartışmasız korumaktadır. Küçük, orta ve büyük ölçekli açık maden işletmelerinde basamak duraylılığı ve planlanan şev açılarının korunması, iyi planlanmış delme-patlatma ile sağlanmaktadır. Bunun yanında metal ve agrega madenciliği gibi kaya kütlesinden kazılan cevherin doğrudan kullanılmadığı, devam eden boyut küçültme işlemlerine tabi tutulduğu durumlarda boyut küçültmenin ilk aşaması olan delme-patlatma, devam eden işlemlerin verimliliğini etkilemektedir. Şekil 1'de açık maden işletmesi cevher zenginleştirme öncesi akım şeması verilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü gibi patiatma sonrası devam eden işlemlerin

tamamında kayacın fiziksel boyutu, maliyetler ve verimlilik açısından önemlidir. Örneğin kazı ve yükleme makinelerinin kepçe dolun faktörü, nakliye araçlarının taşıma kapasitelerinde etkili olan kabarma faktörü, kırma, ufalama ve öğütme işlemlerinde ise enerji sarfiyatları doğrudan kayacın boyutu ile ilgilidir.

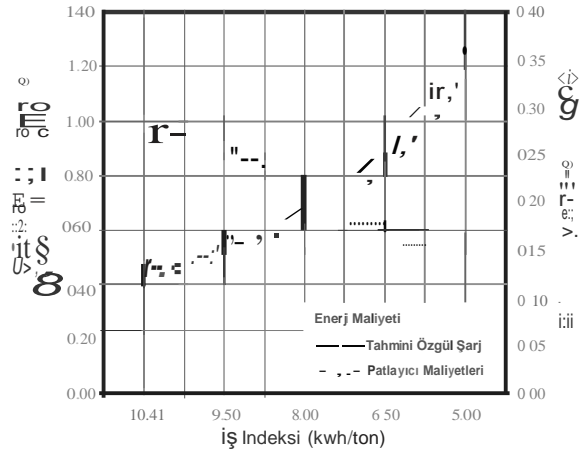


Şekil 1. Açık maden işletmesi operasyon akım şeması

Delme-patiatma işlemleri sonucu oluşan boyut dağılımının etkisinin araştırılması ile ilgili yapılan öncü çalışmalar delme-patiatma maliyetlerinin belirlenmesine ve boyut dağılımının kazı+yükleme, nakliye işlemlerinin verimliliği üzerinedir. Mackenzie's (1967) yaptığı çalışmada delme-patiatma maliyetlerin boyut dağılımının derecesine bağlı olarak ton başına sabit kaldığı veya arttığı sonucuna ulaşmıştır. Currie (1973)'e göre verimlilik ve enerji sarfiyatı optimizasyonunda malzeme boyutunun birincil kırıcıların boyutlandırılmasında belirleyici olması gerekmektedir. Currie (1973) birincil kırıcılar için besleme malı maksimum boyutun 1520 mm olarak öngörmüştür. Tunstall ve Bearman (1997) boyut dağılımının kırma-ufalama operasyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlar ve besleme malı maksimum boyutun birincil çeneli kırıcı giriş açıklığının %75-80'i, darbeli kırıcılar için giriş açıklığının %80'i olması gerektiğini önermişlerdir. Nielsen ve Kristiansen (1996), boyut dağılımının kırma-ufalama üzerine etkisinin bir çok saha

patiatalmaları ve laboratuvar ölçekli patiatalmaları inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmalarında boyut dağılımının kırma-ufalama ve öğütme üzerinde önemli etkisi olduğunu saptamışlardır. Nielsen (1999) dört farklı kayaç tipinin laboratuvar boyutunda patiatalma testlerine tabi tutmuş ve bilyalı değirmen öğütme verimini araştırmıştır. Özgül şarj miktarını artırarak yaptığı bu testlerde patiatalma sırasında özellikle mineral tane sınırları boyunca oluştuğu öngörülen mikro çatlakların öğütebilirlik ile doğrudan ilişkisi olduğunu ortaya koymuştur (Muhammad, 2009).

Workman ve Eloranta (2003) boyut dağılımının kırma-ufalama ve öğütme verimine etkisini enerji tüketimleri açısından incelemişlerdir. Madencilik operasyonlarının büyük miktarlarda enerji tüketimine neden olduğunu belirtmişler, Bond iş indeksi, patiatalma maliyeti ve enerji maliyeti arasında Şekil 2'de verilen ilişkiyi ortaya koymuşlardır.



Şekil 2. Özgül şarj ve enerji maliyetleri ilişkisi (Workman ve Eloranta, 2003)

Workman ve Eloranta (2003) yaptıkları çalışmada, patiatalma sonucu oluşan ortalama boyut dağılımını 40 cm'den 30 cm' düşürecek şekilde özgül şarj miktarını 0.33 kg/ton'dan 0.45 kg/ton'a arttırdıkları durumda toplam maliyetlerinin (patiatalma, kırma-ufalama ve öğütme) ton başına 0.39 \$(ABD) azalacağını hesaplamışlardır.

### 3. BOYUT DAĞILIMININ TAHMİNİ

Boyut dağılımının tahmini için en popüler model Cunningham'ın (1983,1987) geliştirdiği Kuz-Ram modelidir. Kuz-Ram modeli, Kuznetsov (1973) tarafından ortalama boyut ( $X_{50}$ )

tahmini için önerilen ampirik eşitlik ile Rosin ve Rammler (1933) tarafından önerilen boyut dağılım fonksiyonunun Cunnigham'ın (1983) birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Sonrasında boyut dağılımının tahmini ile ilgili yapılan çalışmalarda ya Kuz-Ram modelinin yetersiz olduğu öne sürülerek alternatif model geliştirilmeye çalışılmış yada bu modelin yetersizliğini giderecek yeni katsayılar geliştirilmiştir. Bu anlamda Kuz-Ram modeli basamak patlatmaları sonucu oluşan yığın boyut dağılımının tahmin edilebilirliğinin mümkün olabileceğinin veya olamayacağını tartışıldığı çıkış noktası olmuştur. Bir taraftan patlatmalarda kontrol edilemeyen kaya kütlesi özellikleri nedeniyle boyut dağılımının herhangi bir şekilde kestirmenin mümkün olmayacağını ve yaptıkları patlatmalar sonucu oluşan boyut dağılımının Kuz-Ram tahmin modelinden çok farklı olduğunu öne süren araştırmalar rapor edilirken diğer taraftan boyut dağılımının tahmini için en az hata ile genel bir yaklaşımın olması gerektiğini savunan ve yaptıkları çalışmalar ile bunu doğrulamaya çalışan araştırmalar yapılmıştır.

### 3.1. Kuz-Ram Tahmin Modeli

Kuznetsov (1973) birim hacim başına patlayıcı miktarı (ölgül şarj) ile ortalama boyut arasında kaya kütlesinin de bir fonksiyonu olarak bağıntı 1'de verilen formülü önermiştir.

$$X_{50} = A \left( \frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \quad (1)$$

Burada  $X_{50}$  ortalama boyut (cm), A kaya faktörü,  $V_o$  delik başına patlatılacak hacim (dilim kalınlığı x delikler arası mesafe x basamak yüksekliği,  $m^3$ ),  $Q_e$  delik başına kullanılan nitrogliserin esaslı patlayıcı (kg). Bağıntı 1'de verilen ortalama boyut dağılımı nitrogliserin esaslı detonasyon hızı fazla patlayıcı maddeler için önerilmiştir. Bu patlatıcıların gücü yaygın olarak kullanılan Anfoya oranla fazladır. Bu nedenle bağıntı 1'in Anfo kullanıldığı duruma göre düzeltme katsayısı bağıntı 2'deki gibi verilmiştir. Anfo kullanıldığı durumda  $S_{Anfo} = 100$  olarak alınır. (Kuznetsov, 1973)

$$X_{50} = A \left( \frac{V_o}{Q_e} \right)^{0.8} Q_e^{1/6} \left( \frac{S_{Anfo}}{115} \right)^{19/30} \quad (2)$$

Basamak patlatmasında kullanılan önemli parametrelerden birisi birim hacim başına kullanılan patlayıcı miktarı olarak tarif edilen ölgül şarj ( $q$ ,  $kg/m^3$ ) miktarıdır. Ölgül şarj miktarı bağıntı 3'de verilmiştir.

$$\frac{1}{q} = \frac{V_o}{Q_e} \quad (3)$$

Bu durumda amaçlanan ortalama boyut dağılımı belirlendiğinde gerekli ölgül şarj miktarı bağıntı 2 ile bağıntı 3 kullanılarak bağıntı 4'de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$q = \left[ \frac{A}{X_{50}} Q_e^{1/6} \left( \frac{115}{S_{Anfo}} \right)^{19/30} \right]^{-1.25} \quad (kg/m^3) \quad (4)$$

Kullanılan patlayıcı miktarı ve ölgül şarj miktarı boyut dağılımının tahmini için verilen eşitliklerde büyüklük olarak kullanılabilirken kaya kütlesinin etkisi bir faktör olarak 7 ile 13 arasında önerilmiştir. Kaya faktörünün de kaya kütlesinin karakteristik özelliklerini yansıtamadığı eksikliği Cunnigham'ın (1983) tarafından giderilmeye çalışılmıştır. Kaya kütlesi patlatılabilirliği ile ilgili Lilly (1986) tarafından önerilen kaya kütlesi patlatma indeksi, ortalama boyut tahmini eşitliğinde kullanılan kaya faktörünün belirlenmesinde baz alınmıştır. Buna göre kaya faktörünün hesaplanmasında kullanılan formül bağıntı 5'de kullanılan değişkenler Çizelge 1'de verilmiştir.

$$A = 0.06(RMD + RDI + HF) \quad (5)$$

Uygulamada özellikle kaya kütle sayısının (RMD) tespit edilmesindeki güçlüklerden dolayı A değeri orta sert kaya kütleleri için 7, sert çok fisürlü kaya kütleleri için 10, sert az fisürlü kaya kütleleri için 13 olarak pratikleştirilmiştir.

Rosin ve Rammler (1933) boyut dağılımı fonksiyonunu bağıntı 6'daki gibi tanımlamışlardır.

$$R_m = 1 - e^{-\left( \frac{X}{X_c} \right)^n} \quad (6)$$

**Çizelge 1. Kaya Faktörü (A) Belirlenmesinde Kullanılan Değişkenlerin Tanımı ve Hesaplanması (Cunningham,1983)**

RMD Kaya kütle sayısı	
Eğer kaya kütlesi kırılğan gevrek yapıdaysa	RMD = 10
Eğer düşey yönde süreksizlikler varsa	RMD = JF
Eğer masif yapıdaysa	RMD = 50
JF Kaya Kütlesi Süreksizlik Katsayısı	
JF = JPS+JA	
JPS Düşey Süreksizlik aralığı	
Eğer ortalama süreksizlik aralığı < 0.1m	JPS = 10
Eğer ortalama süreksizlik aralığı 0.1m < X < İri Blok boyutlu (~ 0.5m)	JPS = 20
Eğer ortalama süreksizlik aralığı İri blok < X < Dilim Kalınlığı (m)	JPS = 50
JPA Süreksizlik düzlemi açısı	
Eğer düzlem açısı yüzeyin dışına doğru ise	JPA = 20
Eğer düzlem açısı yüzeye dik ise	JPA = 30
Eğer düzlem açısı yüzeyin içinde kalıyorsa	JPA = 40
RDI Kayaç yoğunluğu Faktörü	
Kayaç Yoğunluğu RD (t/m <sup>3</sup> )	RDI = 25 RD-50
HF Sertlik faktörü	
Eğer Young Modülü Y<50	HF = Y/3
Eğer Young Modülü Y>50	HF = 0.5

Burada  $R_m$  belirlenen boyutta geçen malzeme oranı (%),  $X$  belirlenen boyut (elek açıklığı, mm),  $n$  üniformluk indeksi,  $X_c$  karakteristik boyut (mm) olarak tarif edilen ölçek faktörüdür. Bu eşitliğe göre bir dağılım eğrisinin çizilebilmesi için üniformluk indeksi ( $n$ ) ve karakteristik boyut ( $X_c$ ) bilinmesi yeterli olacaktır. Karakteristik boyutun ( $X_c$ ) belirlenmesi için bağıntı 6 tekrar düzenlendiğinde bağıntı 7'deki gibi ifade edilebilir.

$$X_c = \frac{X}{\sqrt[n]{-\ln(1-R_m)}} \quad (7)$$

Cunningham (1983)  $X_{50}$  değeri Kuznetsov tarafından önerilen ortalama boyut değeri ( $X=X_{50}$ )

ve  $R_m=0.5$  (%50) kabul ederek dağılımı belirlemiştir. Buna göre bağıntı 7 karakteristik boyut formülü bağıntı 8'deki gibi yazılabilir.

$$X_c = \frac{X}{\sqrt[0.693]{n}} \quad (8)$$

bağıntı 6'da verilen Rosin ve Rammler dağılım fonksiyonunun belirlenmesi için üniformluk indeksinin bilinmesi gerekmektedir. Cunningham (1983,1987) boyut dağılımının tahmininde patlayıcı ve kaya kütlesi ile ilgili faktörleri Kuznetsov eşitliği ile sağlamış, delik patemi ve patlatma geometrisi ile ilgili değişkenlerin belirlenmesi için de üniformluk indeksini ( $n$ ) bağıntı 9'da verildiği şekilde önermiştir.

$$n = 2.2 \cdot 14 \left( \frac{B}{D} \right)^{1.5} \left( \frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{-0.5} \left( 1 - \frac{W}{B} \right) \left[ \frac{BCL - CCL}{L} + 0.1 \right]^{0.1} \frac{L}{H} \quad (9)$$

Burda B dilim kalınlığı (m), S delikler arası mesafe (m), D delik çapı (mm), W delme doğruluğundaki standart sapma (m)  $W=0.1+(0.03 \cdot H)$ , H basamak yüksekliği (m), BCL taban şarj boyu (m), CCL=kolon şarj boyu (m) dir. Üniformluk indeksi ( $n$ ) Rosin ve Rammler dağılım eğrisinin eğimini belirleyen ana katsayıdır. Üniformluk değerinin yüksek olması boyut dağılımının dik ve üniform dağılımı belirlerken düşük üniformluk katsayısı yığının boyut dağılımının üniform olmadığına göstergesidir. Bağıntı 9'da görüldüğü gibi dilim kalınlığı/delik çapı oranı üniformluk katsayısını azaltır, delikler arası mesafe/dilim kalınlığı üniformluk katsayısını artırır. Normalde  $n$  değeri 0.75 ile 1.5 arasında değişir.

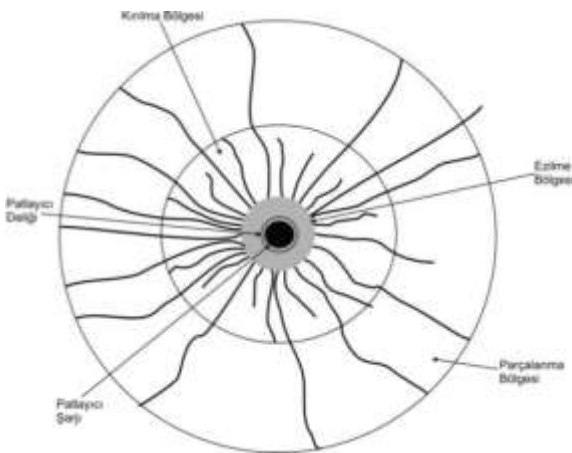
Cunningham (1983, 1987), Kuz-Ram boyut dağılım tahmin modeli uygulamasında bazı ihmal edilen parametrelerin olduğunu belirtmiştir. Bunlardan birincisi ateşleme sırası ve gecikme aralığının modelde değerlendirilmemesi ikincisi ise patlayıcı enerjisinin göreceli olarak modelde yer almasıdır. Ayrıca parçalanma boyut dağılımını etkileyen ana değişkenin özellikle çok süreksizlikli yapılarda kaya kütlesi özellikleri olduğunun üzerinde durmuştur (Hustrulid,1999).

Bunun yanında tahmin modelleri homojen süreksizlik içermeyen masif kayalarda gerçeğe yakın değerler vermektedir. Kaya kütlesi

özellikleri, tahmin modellerinde katsayı olarak veya belli süreksizlik özellikleri ile ilişkilendirilen sayısal değer olarak kullanılmaktadır. Daucet (1995) kaya kütlesi sınıflama sistemlerinden RMR sınıflama sitemi, Q sınıflama sitemi ve RQD kaya kalite göstergesi ile boyut dağılımı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Buna göre sınıflama sistemlerinde düşük kaya kütlesi özelliklerinin üniform olmayan boyut dağılımına neden olduğu sonucunu rapor etmiş ve boyut dağılımının tahmin modellerinde gerçekçi yaklaşımların yapılabilmesi için kaya kütle sınıflama sistemlerinin kullanılması gerektiğini önermiştir.

### 3.2. Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkezi (JKMRC) Tahmin Modelleri

Kuz-Ram tahmin modelinin pratik uygulamalarda boyut dağılımının belirlenmesinde ince boyut dağılımlarında kabul edilebilir hata sınırlarının dışında kalması nedeniyle Julius Kruttschnitt Mineral Araştırma Merkezi (Julius Kruttschnitt Mineral Research Center-JKMRC) araştırmacıları Kuz-Ram boyut dağılım modeli baz alınarak iki farklı boyut dağılım modeli geliştirilmiştir. JKMRC modelleri boyut dağılımını, Şekil 3'de şematik olarak gösterilen patlatma deliği etrafında oluşan patlayıcı basıncına ve gerilme dağılımına bağlı olarak oluşan bölgelerin belirlediğini öne sürmüşlerdir. Bu varsayım ile modellerini ezilme bölgesinin ince boyut dağılımını, kırılma bölgesinin de iri boyut dağılımını belirlediği ilkesine göre geliştirmişlerdir (Demenegas, 2008).



Şekil 3. Patlatma deliği ve çevresi ateşleme sonrası şematik görüntüsü (Esen vd, 2003)

### 3.2.1. Ezilme Bölgesi Modeli (CZM)

Ezilme bölgesi modeli (CZM - Crushed Zone Model) iki farklı Rosin-Rammler fonksiyonu kullanarak boyut dağılım tahmini yapar. Birinci fonksiyon ince boyut dağılım fonksiyonu, ikinci fonksiyon ise iri boyut dağılım fonksiyonudur. Buna göre iri ince sınırı baz olarak 1 mm olarak belirlenmiştir. Ezilme bölgesi boyut dağılım modelinde iri dağılım fonksiyonu Rosin-Rammer fonksiyonu dağılımın belirlenmesi için  $n$  ve  $X_c$  nin hesaplanması gerekir (Demenegas, 2008). iri boyut dağılımı aşağıda verilen bağıntı 10 ile hesaplanır.

$$R_{m-1} = e^{-\left[ \ln(1-R(X_c)) \right]^{n_i} \left( \frac{X}{X_c} \right)^{n_i}} \quad (10)$$

Burada  $R_m$  belirlenen boyutta toplamalı malzeme oranı (%),  $R(X_c)$  karakteristik boyutta geçen malzeme oranı (%),  $X$  belirlenen elek açıklığı (m),  $X_c$  karakteristik boyut (m),  $n_i$ ; iri boyut için üniformluk katsayısı

$$n_i = \left( 2.2 - 14 \left( \frac{B}{D} \right) \right) \sqrt{\left( \frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right) \left( \frac{L_i}{H} \right)} \quad (11)$$

ince boyut dağılımı ezilme bölgesinin çapının belirlenerek, delik boyu ile ezilme bölgesindeki malzeme hacminin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Patlayıcı enerjisi sıkıştırma basıncının kaya kütlesinin basınç dayanımını aştığı bölge olan ezilme bölgesi yarıçapı bağıntı 12 ile hesaplanabilir (Demenegas, 2008).

$$r_c = r \sqrt{\frac{P_d}{\sigma_c}} \quad (12)$$

Burada  $r_c$  ezilme bölgesi yarıçapı (m),  $r$  delik yarıçapı (m),  $P_d$  detonasyon basıncı (Pa),  $\sigma_c$  kayacın tek eksenli basınç dayanımıdır (Pa). Detonasyon basıncı bağıntı 13 ile hesaplanabilir.

$$P_d = \rho_c \frac{C_d^2}{4} \quad (13)$$

Burada  $P_d$  detonasyon basıncı (pa),  $C_d$  detonasyon hızı (m/sn),  $\rho_c$  patlayıcı yoğunluğudur (kg/m<sup>3</sup>). Ezilme bölgesi ince boyut dağılımı fonksiyonu bağıntı 14'de verilmiştir (Demenegas, 2008)..

$$R_m = 1 - e^{-\left[ \ln(1-R(X_c)) \left( \frac{X}{X_c} \right)^{n_{ince}} \right]} \quad (14)$$

Bu dağılımın belirlenebilmesi için  $n_{ince}$  üniformluk katsayısının bilinmesi gerekir.  $n_{ince}$  üniformluk katsayısı bağıntı 15 ile hesaplanır. bağıntı 15'de  $F_c$  ezilmiş malzeme oranı toplam

$$n_{ince} = \frac{\ln \left( \frac{\ln(1-F_c)}{\ln(1-R(X_c))} \right)}{\ln \left( \frac{1}{X_c} \right)} \quad (15)$$

yığın miktarının ezilme bölgesi malzeme miktarına oranı olarak ifade edilir ve bağıntı 16 ile hesaplanır (Demenegas, 2008)..

$$F_c = \frac{V_c}{V_b} \quad (16)$$

Burada  $F_c$  ezilmiş bölge malzeme oranı,  $V_c$  ezilmiş bölge malzeme hacmi (m<sup>3</sup>),  $V_b$  toplam malzeme hacmidir(m<sup>3</sup>).

### 3.2.2. İki Elemanlı Model (TCM)

İki elemanlı model (TCM-Two Component Model), iri ve ince boyut dağılımın aynı fonksiyonda aynı üniformluk katsayısı ile belirlenir. Bu özelliği ile kritik iri-ince sınırı belirlenerek birbirinden farklı üniformluk katsayıları kullanılan ezilme bölgesi modelinden (CZM) ayrılır. İki elemanlı model boyut dağılım fonksiyonu bağıntı 17'de verilmiştir (Demenegas, 2008).

$$R_m = 100 \left( 1 - (1 - F_c) e^{-\ln 2 \left( \frac{x}{a} \right)^b} - F_c e^{-\ln 2 \left( \frac{x}{c} \right)^d} \right) \quad (17)$$

Burada  $R_m$  belirlenen boyutta toplamalı malzeme oranı (%),  $F_c$  ezilmiş bölge malzeme oranı, (%), bağıntı 16),  $a$  ezilme bölgesi dışında kalan ortalama boyut (m),  $b$  ezilme bölgesi dışında kalan üniformluk katsayısı,  $c$  ezilme

bölgesi ortalama boyut (m),  $d$  ezilme bölgesi üniformluk katsayısıdır. Bağıntı 17 'de görüldüğü iki elemanlı dağılım fonksiyonunun esası ezilme bölgesi dışındaki dağılım fonksiyonunun ezilme bölgesi dağılım fonksiyonundan çıkarılmasıdır. Bu nedenle iki elemanlı dağılım modelinde  $a$  ve  $b$  katsayıları Kuz-Ram dağılım modelindeki  $X_{50}$  ile  $n$  üniformluk katsayısı ile aynıdır. Ancak ezilme bölgesi ortalama boyut dağılımı ve üniformluk katsayısının ( $c$  ve  $d$ ) kayacın laboratuvar ortamında teste tabi tutularak ezilme bölgesi malzemesinin elek analizi değerlerinden belirlenmesi önerilmiştir. İki elemanlı modelde ezilme bölgesi malzeme hacminin belirlenmesi için gerekli yarıçap ezilme bölgesi modeli (CZM)'den farklı olarak önerilmiştir. Buna göre iki elemanlı model (TCM) ezilme bölgesi yarıçapı  $r_c$  bağıntı 18 ile hesaplanabilir .

$$r_c = \left( \frac{24TS_{yerinde}}{F_b} \right) \quad (18)$$

Burada  $r_c$  ezilme bölgesi yarıçapı(m),  $r$  delik yarıçapı (m),  $P_d$  detonasyon basıncı (Pa),  $TS_{yerinde}$  kaya kütleşi yerinde çekme dayanımıdır(Pa) ve bağıntı 19 ile hesaplanabilir.

$$TS_{yerinde} = \sigma_{dT} \left( \frac{0.05}{OBB} \right)^{0.18} \quad (19)$$

Burada  $\sigma_{dT}$  kayacın çekme dayanımı (Mpa),  $OBB$  ortalama blok boyutudur (m).

### 3.3. KCO Dağılım Modeli

KCO dağılım modeli Ouchterlony (2005) tarafından Kuz-Ram modelinin eksiklerinin giderilmesi için önerilmiştir. Ouchterlony, Kuz-Ram dağılım modelinin boyut dağılımının tahmininde ince ve iri boyut oranlarında hatalı olduğunu göz önünde bulundurarak Rosin-Rammer dağılım fonksiyonundan farklı bir fonksiyon önermiştir. Swebrec fonksiyonu olarak bilinen bu fonksiyon kullanılarak boyut dağılımı modelini Ouchterlony 2005 yılında yayınlamış ve KCO (Kuznetsow, Cunningham, Ouchterlony) dağılım modeli olarak adlandırmıştır. Boyut dağılım modelinde kullanılan Swebrec dağılım



fonksiyonunda 3 parametre kullanılmaktadır.  $X_{50}$  malzemenin % 50 sinin elekten geçtiği ortalama boyut,  $x_{max}$  en büyük parça boyutu ve  $b$  dağılım fonksiyonunun kıvrımlılığını belirleyen katsayı. Bu katsayı Rosin -Rammer dağılım fonksiyonuna önerilen  $n$  üniformluk katsayısına benzerdir. KCO modelinde kullanılan eşitlikler bağıntı 20 ve 21 de verilmiştir.

$$R_m = \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{\ln\left(\frac{X_{max}}{X}\right)}{\ln\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right)} \right\}^{-b}} \quad (20)$$

$$b = \frac{2 \ln 2 \ln\left(\frac{X_{max}}{X_{50}}\right)}{n} \quad (21)$$

Burada  $R_m$  belirlenen boyutta toplamalı malzeme oranı (%),  $b$  dağılım fonksiyonu kıvrımlılık katsayısı,  $X$  belirlenen elek açıklığı (cm),  $X_{50}$  ortalama boyut (Kuz-Ram modeli ile aynı, cm),  $n$  üniformluk katsayısı (Kuz-Ram modeli ile aynı),  $x_{max}$  en büyük parça boyutudur(cm) (Ouchterlony, 2005).

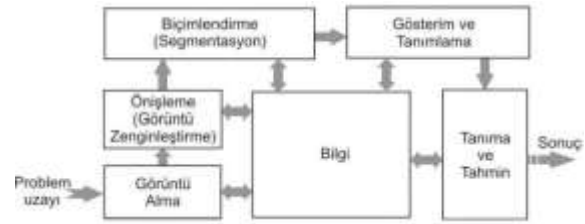
#### 4. GÖRÜNTÜ ANALİZ YÖNTEMİ

Görüntü, iki boyutlu bir işaret kayıdır. Fotoğraf gibi gözle görünen bir biçimde olabileceği gibi, manyetik bantta yazılı bir kayıt, yada bilgisayar belleğinde duran sayısal değerler biçiminde olabilir. Görüntüler sürekli-ayrık, analog-sayısal veya sürekli-sayısal olabilirler. Bir görüntü üzerindeki parlaklık hem seviye olarak hem de konum olarak sürekli değişen bir değişkendir. (Karakuş, 2007). Bilgisayar belleğinde pikseller şeklinde görüntü içindeki parlaklık değerlerinin farklı cisimlerin ve nesnelerin sınırlarının belirlenmesi, görüntü işleme yöntemlerinin kullanılabilirliğini sağlamıştır. Bu anlamda özellikle tıp alanında görüntüleme cihazları ile elde edilen görüntülerin analiz edilerek veri üretilmesi öncü çalışmaları oluşturmuş sonrasında bir çok disiplinde hızlı ve kolay bir ölçüm tekniği olması nedeniyle kendine kullanım alanı bulmuştur.

Görüntü analiz metotlarının yerbilimlerinde ilk uygulamaları ise boşlukların ölçümü ve tanımlanması alanında yapılmıştır. Buna paralel

olarak kaya yüzeylerinde bulunan süreksizlikler ve tane büyüklüklerinin, renk gibi görüntünün tanımlanabilen farklı özellikleri kullanılarak analizleri yapılmıştır.

Sayısal görüntü analizi yapan bir çok ticari programlar olmakla birlikte hepsinde ortak olan analizin aşamaları genel olarak Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Görüntü işleme genel akım şeması (Gonzales ve Woods, 1993)

Sayısal resim elde edildikten sonra ön-işleme tabii tutulur. Adından da anlaşıldığı gibi ön-işleme, elde edilen sayısal resmi kullanmadan önce daha başarılı bir sonuç elde edebilmek için, bazı ön işlemlerden geçirilmesidir. Bu işlemlere örnek olarak; kontrastın ayarlanması, resimdeki gürültülerin azaltılması ve/veya yok edilmesi, resimdeki bölgelerin birbirinden ayrılması gibi işlemler verilebilir.

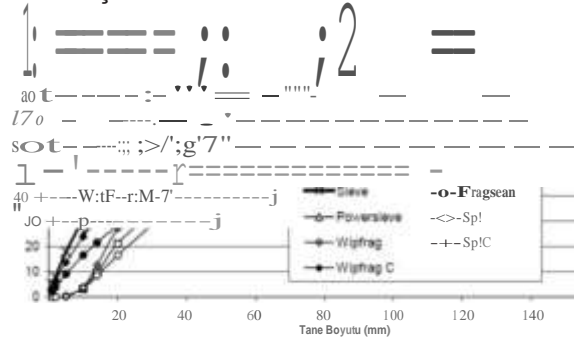
Bundan sonraki aşamada görüntü biçimlendirme (segmentation) basamağına geçilir. Görüntü biçimlendirme, bir görüntüdeki nesne ve artalanın veya resim içerisindeki ilgilenilen değişik özelliklere sahip bölgelerin birbirinden ayrıştırılması işlemidir. Biçimlendirme görüntü işlemenin en zor uygulamasıdır ve biçimlendirme tekniklerinin sonuçlarında belli bir hata oranı olabilmektedir. Görüntü biçimlendirme bir resimdeki nesnenin sınırları, şekli veya o nesnenin alanı gibi ham bilgiler üretir. Eğer objelerin şekilleriyle ilgileniliyorsa biçimlendirmeden o nesnenin kenarları, köşeleri ve sınırları hakkında bilgi vermesi beklenir. Fakat görüntü içerisindeki nesnenin yüzey kaplaması, alanı, renkleri, iskeleti gibi iç özellikleriyle ilgileniliyorsa bölgesel biçimlendirme kullanılması gerekir. Karakter veya genel olarak örnek (pattern) tanıma gibi oldukça karmaşık problemlerinin çözümü için her iki biçimlendirme metodunda bir arada kullanılması gerekebilmektedir (Karakuş, 2007).

Görüntü analizi ile boyut dağılımının tespit edilmesi konusunda ilgili araştırmalar ise mikro ve makro ölçekte yapılmıştır. Tane boyut dağılımının belirlenmesi ile ilgili özellikle mikroskop görüntülerinde mineral tanelerinin dağılımı ve boşluk oranı tespiti gibi çalışmalar yapılsa da madencilik endüstrisinde patiatma veriminin değerlendirilmesinde kendine kullanım alanı bulmuştur. Patiatmalar sonucu oluşan boyut dağılımının elle ölçülmesi oldukça zor ve maliyetli bir iştir. Görüntü işleme metodları ile parça boyut dağılımının hızlı bir şekilde yapılabilmesi ve patiatma veriminin değerlendirilmesinin avantajlarını gören çeşitli gruplar ve organizasyonlar araştırmalarını ilerleterek sadece patiatmalar sonucu oluşan yığın boyut analizi yapan programlar geliştirmişlerdir. Bu programlar temel görüntü işleme ek olarak boyut dağılımı grafiğini ve sayısal verilerini üretmeye yöneliktir. Bunlardan bazıları; IPACS (Dahlheim, 1996), TUCIPS (Havermann ve Vogt, 1996), Fragscan (Schleifer ve Tessier, 1996), CIAS (Downs ve Kettunen, 1996), GoldSize (Kleine ve Cameron, 1996), WipFrag (Maerz vd, 1996), Split Desktop (Kemeny, 1994), PowerSieve (Chung ve Noy, 1996) ve Fragalyst (Raina vd, 2002) dir.

Görüntü analiz yöntemiyle yığın boyut dağılımının belirlenmesi ilk kez Carlsson ve Nyberg (1983) tarafından uygulanmış ve yöntemin uygulanabilmesi için hala geçerli olan birkaç temel kural önermişlerdir. Bunlar analiz edilecek görüntüde en büyük tane boyutu ile en küçük tane boyutu arasında en fazla 20 kat fark olması gerekliliği ve en küçük tane boyutunun görüntü çözünürlüğünün en az 3 katı olması gerekliliğidir. Sonrasında yapılan araştırmalarda görüntü analiz yönteminin yığın karakteristiğinden kaynaklanan eksiklikleri vurgulanmış ve doğruluk derecesi sorgulanmıştır. Cunningham (1996) yığın görüntüsü ile nakliye kamyonu kasasından alınan yığın görüntüsü ve kırıcı öncesi nakliye bantı üzerinden alınan yığın görüntüsünü karşılaştırmış, patiatma sonucu oluşan yığın boyut dağılımı görüntü analizi hatalarının nakliye bantı üzerinde sürekli yapılan görüntü analizi yöntemiyle azaltıldığını ortaya koymuştur. Liu ve Tran (1996) üç farklı program (Fragscan, WipFrag, Split) ile yaptığı incelemede hepsinde farklı boyut dağılımları elde etmiştir. Benzer şekilde Katsabanis (1999) 0.85 -19 mm arasında laboratuvar ortamında oluşturulan suni bir yığının boyut dağılımını WipFrag ve Split Desktop programları ile belirlemiş ve bu programların en yakın

sonuçları verdiğini belirtmişlerdir. Karşılaştırma ile ilgili en popüler çalışma ise Latham vd, (2003)'ün yaptığı araştırmadır. Araştırmada Fragscan, PowerSieve, Split ve WipFrag programları ile farklı dağılıma sahip test yığınlarının karakteristik boyut ( $X_c$ ) ve dağılımın üniformluk katsayısını karşılaştırmışlardır (Şekil5).

Buna göre genel olarak karakteristik boyutu küçük olan görüntülerde programların başarılı, büyük olanlarda ise başarısız olduğunu PowerSieve, Split ve WipFrag programlarının üniform dağılımlarda yüksek doğruluk oranlarına ulaştığını belirtmişlerdir.



Şekil 5. Örnek boyut dağılımı (Latham vd, 2003)

## 5. BOYUT DAĞILIM TAHMİN MODELLERİ VE GÖRÜNTÜ ANALİZİ KARŞILAŞTIRILMASI UYGULAMA PATLATMASI

Boyut dağılım tahmin modelleri kullanılarak elde edilen dağılım ile görüntü analizi sonucu elde edilen boyut dağılımının karşılaştırılmasında bir basamak patiatması dizaynı ile boyut tahmin modelleri yapılmış ve patiatma sonucu oluşan yığını temsil eden 4 farklı bölgeden görüntü alınarak görüntü analizi programları kullanılmış ve oluşan boyut dağılımı ile karşılaştırılması yapılmıştır. Boyut dağılım tahmin modellerinden ham haliyle Kuz-Ram model ve Ouchterlony tarafından 2005 yılında Kuz-Ram modeli üç parametreliliğe getirildiği ve doğrulamasını gerçek boyutlu patiatma tahminleri ile yaptığı KCO tahmin modeli kullanılmıştır. Patiatma sonrası oluşan yığının tahmin değerlerinin kıyaslanabilmesi için literatürde benzerlerine göre üstünlükleri belirtilen Split Desktop programı ve WipFrag programı kullanılmıştır. Uygulama patiatması aktif olarak faaliyet gösteren bir kalker ocağında tek sıra olarak planlanmıştır. Patiatmanın teknik verileri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 Uygulama Patlatması Teknik Verileri

Delik Çapı	89.0 mm
Basamak Yüksekliği	13.0 m
Delik boyu	14.3 m
Dilim Kalınlığı	2.0 m
Delikler Arası Mesafe	2.5 m
Delik Şarjı	56.0kg
Şarj Kolonu Yüksekliği	10.0 m
Sıkılama	4.3 m
Kaya Faktörü	10

Çizelge 2'de teknik detayları verilen uygulama patlatmasının Kuz-Ram tahmin dağılımının belirlenebilmesi için ortalama tane boyutu ( $X_{50}$ ) ve üniformluk katsayısı (n) hesaplanması bağıntı 22 ve 23'de verilmiştir.

$$X_{50} = 10 \left( \frac{2.5 \times 2 \times 13}{56} \right)^{0.8} 56^{1/8} \left( \frac{100}{115} \right)^{19/30} = 24.1 \text{ cm} \quad (22)$$

$$n = \left( 2.2 - 14 \left( \frac{2}{89} \right) \right) \left( \frac{1 + \frac{2.5}{2}}{2} \right)^{-0.9} \left( 1 - \frac{0.35}{2} \right) \left( \frac{1.3 - 10}{10} + 0.1 \right)^{0.1} \left( \frac{10}{13} \right) = 1.27 \quad (23)$$

Bu verilere dayanarak Kuz-Ram tahmin modeli dağılım eğrisinin belirlenebilmesi için karakteristik tane boyutunun hesaplanması gerekmektedir. Buna göre karakteristik tane boyutu ( $X_c$ )

$$X_c = \frac{24.1}{1.27 \sqrt{\ln(2)}} = 32.15 \text{ cm} \quad (24)$$

olarak bulunur. Bu değerler kullanılarak belirlenen elek açıklıklarında bağıntı 6'da verilen Rosin ve Rammler dağılım fonksiyonu kullanılarak uygulama patlatmasının hesaplanan boyut dağılım değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

KCO tahmin modeli için benzer şekilde bağıntı 20'de verilen üç elemanlı Swebrec dağılım fonksiyonu değişkenlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değişkenlerden ikisi olan ortalama boyut dağılımı ( $X_{50}$ ) ve üniformluk katsayısı (n) yukarıda Kuz-Ram dağılım fonksiyonu için hesaplanan değerlerdir. Swebrec dağılım fonksiyonunun üçüncü elemanı olan kıvrımlık katsayısı ise bağıntı 21'de verilen fonksiyon yardımıyla hesaplanır. Buna göre kıvrımlık katsayısı,

$$b = \left| 2 \ln 2 \ln \left( \frac{107.4}{24.1} \right) \right|^{1.27} = 2.77 \quad (25)$$

olarak hesaplanmıştır.

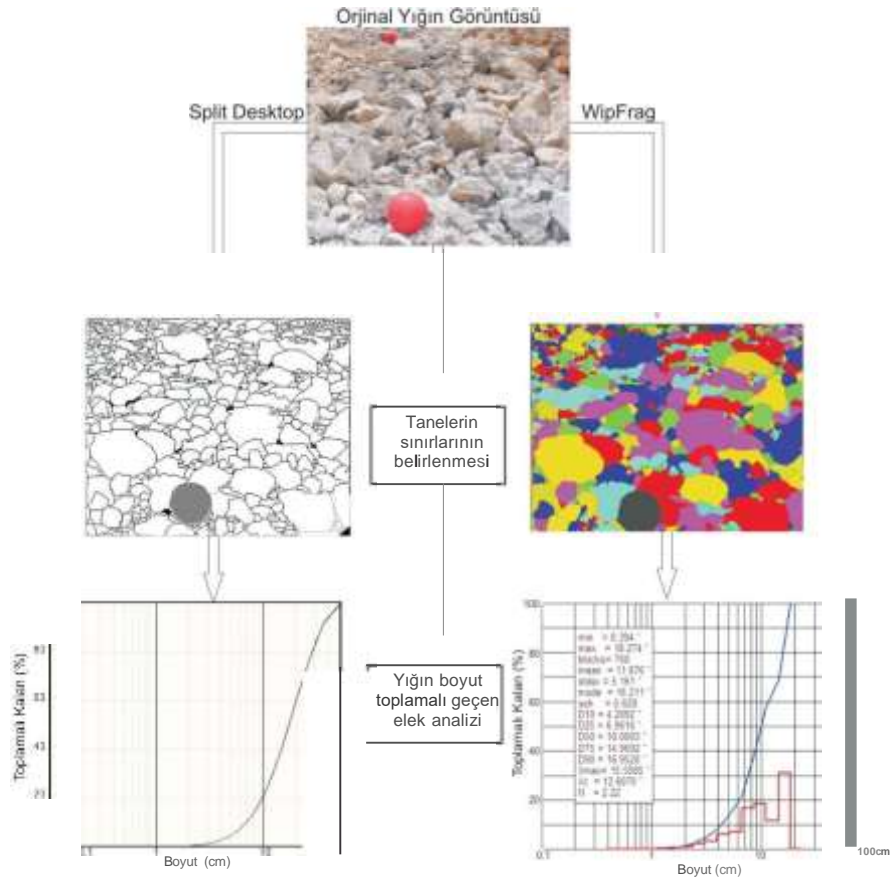
KCO dağılım tahmin modelinde kullanılan ve bağıntı 20'de verilen Swebrec fonksiyonuna göre belirlenen elek açıklıklarında hesaplanan boyut dağılım değerleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Uygulama patlatması sonucu oluşan yığılı karakterize eden farklı görüntülerden birisinin analiz aşamaları Şekil 6' da verilmiştir. Yığın görüntülerinde tane sınırlarının belirlenmesi yığının karakterize edilmesini doğrudan etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda kullanılan iki bilgisayar programının da tane sınırlarının doğru olarak belirlenmesi işlemini büyük ölçüde kullanıcıya bıraktığı görülmektedir. Görüntünün kalitesine göre kullanıcının taneleri elle belirlemesi işlemi bazen görüntü içindeki bütün taneleri tek tek edit etmesine kadar varabileceği, bu nedenle programların görüntü zenginleştirme ve görüntü işleme fonksiyonları açısından performanslarının çok iyi olmadığı belirlenmiştir.

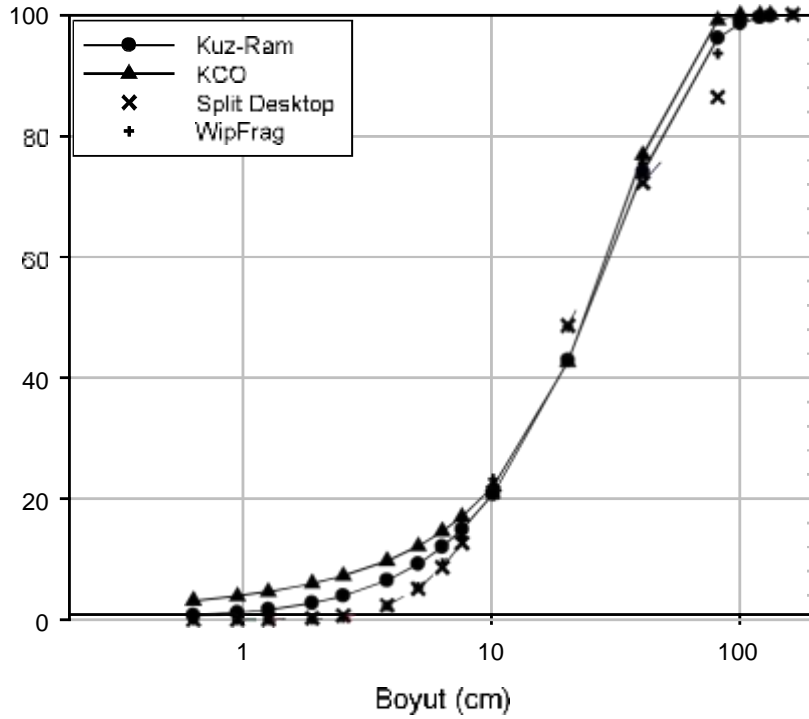
Uygulama patlatması görüntü analizlerinde kullanılan Split Desktop ve WipFrag programları metot olarak benzer şekilde çalışmaktadır. Buna göre öncelikle görüntünün programa yüklenmesi ve ön zenginleştirme aşamaları yapılmaktadır. Daha sonra görüntü üzerinde yığının eğiminin ve perspektif uzaklığının belirlenerek görüntünün ölçekli hale getirilmesi aşaması vardır. Bu işlem ya kullanıcı tarafından arazi ölçümleri ile yada görüntü üzerinde referans büyüklüklerle gerçekleştirilebilir. Yığın görüntüleri eğimli ve derinlemesine olması nedeniyle bu işlem için iki adet referans büyüklük kullanılması zorunludur. Uygulama patlatması yığınının alınmış görüntülerde bu zorunluluk göz önünde bulundurulmuş ve aynı büyüklükte iki adet top kullanılmıştır (Şekil 6). Ölçeklendirilen görüntü içerisindeki tanelerinin sınırlarının belirlenmesi bir sonraki aşamayı oluşturur. Bu aşamada görüntü analizi teknikleri kullanılır ve her tane programların hafızasında görüntü içerisindeki konum ve büyüklüğüne göre depolanır. Bir sonraki aşamada ise programlar belirlenen boyutlarda görüntü içerisindeki tanelerin yüzdelere hesaplar ve grafik şeklinde kullanıcının bilgisine sunar. Uygulama patlatması görüntülerine yukarıdaki aşamaları içeren analizler yapılmış ve bulunan dağılım değerleri Çizelge 3'de verilmiştir. Ayrıca belirlenen boyutlarda görüntü içindeki tanelerin dağılım tahmin modelleri ve birleştirilmiş görüntü analizlerine ait karşılaştırmalı grafik Şekil 7'de verilmiştir.

Çizelge 3. Belirlenen Boyutlarda Tahmin Modelleri (Kuz-Ram ve KCO) ve Görüntü işleme Programları (WipFrag ve Split Desktop) Dağılım Değerleri

Boyut (cm)	Kuz-Ram Model Toplamalı Kalan (%)	KCO Model Toplamalı Kalan (%)	WipFrag Programı Toplamalı Kalan (%)	Split Desktop Programı Toplamalı Kalan (%)
162.56	99.96	100.00	100.00	100.00
81.28	96.07	99.07	93.57	86.36
40.64	73.96	76.79	75.47	72.21
20.32	42.84	42.61	48.43	48.62
10.16	20.74	22.03	23.27	21.12
7.62	14.91	17.03	13.60	12.65
6.35	12.03	14.58	9.27	8.67
5.08	9.21	12.14	5.40	5.14
3.81	6.49	9.72	2.30	2.40
2.54	3.94	7.26	0.37	0.71
1.905	2.75	6.00	0.10	0.27
1.27	1.66	4.66	0.00	0.06
0.9525	1.15	3.94	0.00	0.02
0.635	0.69	3.16	0.00	0.00



Şekil 6. iki farklı bilgisayar programı yığın boyut analizi aşamaları



Şekil 7. Yığın boyut tahmin modelleri (Kuz-Ram ve KCO) ile boyut dağılım görüntü işleme programları (Split Desktop ve WipFrag) birleştirilmiş boyut dağılım grafiği

Şekil 7' de görüldüğü gibi ince ve iri boyutta hem kullanılan tahmin modelleri hem de uygulama patlatması yığın görüntü analizleri dağılımında farklılıklar bulunmaktadır. Buna karşılık ortalama boyut ve bu boyutun yaklaşık % 50 alt ve üst dağılım yüzdeleri hem tahmin modellerinde hem de görüntü analizleri dağılım değerleri ile birbirine çok yakındır. KCO modelinin Kuz-Ram modelinin iri ve ince boyuttaki eksikliklerini gidermek için geliştirdiği ve dağılım eğrisinin gerçek veriler ile hataları en aza indirebilmesi için kıvrımlık katsayısı eklendiği göz önüne alınırsa iri ve ince boyutta görüntü analizi programlarının yetersiz kaldığı söylenebilir. Bu belirli bir alanın görüntüsün alındığında görüntü çözünürlüğünün ince boyuttaki taneleri ayırt edememesi nedeniyle oluşan doğal sonuçtur. Ayrıca iri boyutta oluşan hatalar ise yığın eğiminden ve üçüncü boyuttan kaynaklanan hatalardır. Bu anlamda görüntü analizi kabullerinin de hataları göz önüne alındığında bir patlatma yapmadan önce önerilen dağılım modelleri ile oluşacak yığının ortalama boyutu Cunningham'ın (1983) geliştirdiği Kuz-Ram model ile kabul edilebilir sınırlar içinde tahmin edilebilir. Ancak yığının boyut dağılımının da her ne kadar Ouchterlony (2005) tarafından geliştirilen KCO modelinin uygulamada hata oranının az olduğu rapor edilse de özellikle

kaya kütlesi süreksizlik özelliklerinin belirleyici olduğu durumlarda, en büyük tane boyutu tespiti eksikliği nedeniyle yığın boyut dağılım tahmininde, iri ve ince boyutta gerçekçi bir tahmin teorik kalmaktadır. Ayrıca incelenen modellerin iri ve ince boyuttaki eksikliklerinin giderilmesi için öngörülen JKMRC modelleri, pratikte belirlenmesi ve ölçülmesi neredeyse bütün yığının elek analizine tabi tutulması gibi uygulanması zor girdi parametreleri gerektirmesi nedeniyle burada değerlendirilmemiştir.

## 6. SONUÇLAR

Basamak patlatmaları sonucu oluşan yığının boyut dağılımı hem patlatmanın veriminin değerlendirilmesi hem de devam eden operasyonları doğrudan etkilemektedir. Bu anlamda patlatma yapılmadan önce tasarım parametreleri ve kaya kütle özellikleri göz önüne alınarak boyut dağılımının belirlenmesi önemini korumaktadır. Boyut tahmin modellerinden oluşturulan dağılım değerlerinin doğrulanmasının en doğru yolu bütün yığının doğrudan elek analizine tabi tutulmasıdır. Bundan başka son zamanlarda kendine uygulama alanı bulan görüntü işleme metotları ile tane boyut analizi

patlatma sonucu oluşan yığının dağılımının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu çalışmada boyut dağılım tahmin modelleri ile görüntü analizi ile boyut dağılımı belirleme yapan iki program karşılaştırılmış ve sonuçları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

i) Yapılan önceki araştırmalarda Ouchterlony'nin 2005 yılında geliştirdiği KCO modeli endüstriyel uygulamalar ile doğrulanarak en doğru boyut dağılım tahmin modelidir. Bunun yanında KCO modelinde kullanılan ve modelin temelini oluşturan Kuz-Ram model özellikle ortalama boyut belirlenmesinde kullanılabilir.

ii) Basamak yığını üzerinden görüntü alınarak yapılan boyut analizinin eksikleri bulunmaktadır. Bunun en başında yığının üçüncü boyutunun dikkate alınmaması ve yığının görünen kısmında oluşan boyut dağılımının bütün yığının temsil edememesi gelmektedir. Bu eksiklik, yapılan araştırmalarda nakliye bandı üzerinde sürekli boyut analizi yapılarak veya birincil kırma beslemesi sırasında görüntü alınması yöntemiyle giderilmeye çalışılmaktadır. Görüntü işleme programlarının diğer bir eksikliği ise görüntü çözünürlüğünden kaynaklanan ince boyuttaki malzemenin boyutunun belirlenememesidir. Bu kısıtlar içinde görüntü işleme programları başarılı olarak uygulanabilir.

iii) Karşılaştırma için yapılan uygulama patlatmasına göre görüntü işleme programları ve boyut dağılım tahmin modelleri ortalama boyut ve bu boyutun yaklaşık yarısı az ve yarısı fazla boyutlarda başarılıdır. Ancak bu başarı oranı tamamen üniformluk katsayısına bağlıdır. Üniformluk katsayısının yüksek değerlerde olması basamak patlatmasında kaya kütle özelliklerinin masif ve sağlam yapıda olması durumunda gerçekleşmektedir. Basamak patlatmalarında zayıf, iri bloklu ve süreksizlik aralığının düşük olduğu durumlarda dağılım tahmin modellerinin ana değişkeni olan üniformluk katsayısı düşmekte ve tahminlerin doğruluk oranları tartışılır duruma gelmektedir.

## KAYNAKLAR

Carlsson, O. ve Nyberg L., 1983; "A Method For Estimation Of Fragment Size Distribution With Automatic Image Processing" In Proc. 1st Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting, R

Holmberg ve A. Rustan (editör), 333-345.

Chung, S. H.ve Noy, M. J., 1996;"Experience in Fragmentation Control", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 247-252.

Cunningham, C.V.B., 1983; "The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In Proc. 1st Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting, R Holmberg ve A. Rustan (editör), 439-453.

Cunningham, C. V. B., 1996; "Lessons From The Compaphoto Technique Of Fragmentation Measurement" Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 53-57.

Cunningham, C. V. B., 1987;" Fragmentation estimations and the Kuz-Ram model – four years on". Int. Proc. 2nd Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, W L Fournay & R D Dick (editör), 475-487.

Currie, J. M., 1973; "Unit Operation in Mineral Processing", Department of Chemical and Metallurgical Technology, Bumbay, B.C.

Dahlhielm, S.,1996; "Industrial Applications Of Image Analysis – The IPACS System" Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 67-71.

Demenegas, V., 2008, "Fragmentation Analysis of Optimized Blasting Rounds in the Aitik Mine", Lulea University of Tehcnology, Master Thesis, 10-15.

Downs, D. C. ve Kettunen, B. E., 1996; "On-line Fragmentation Measurement Utilizing The CIAS System", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 79-82.

Doucent, C., 1995; "The Effect of Geology on Fragmentation in Small Development Headings", Master Thesis, McGill University, Montreal, 74.

Esen, S., Onederra, I. ve Bilgin, H. A., 2003; "Modelling The Size Of The Crushing Zone Around A Blasthole" Int. J. Rock Mechs. Min. Sci. 40, 485-495.

- Gonzalez, C. R. ve Woods, E. R., 1993; "Digital Image Processing", Addison -Wesley Publishing.
- Havermann, T. ve Vogt, W., 1996; "TUCIPS – A System For The Estimation Of Fragmentation After Production Blasts" Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 59-65.
- Hustrulid, W., 1999; "Blasting Principles for Open Pit Mining", A.A. Balkema, 112.
- Karakuş, D. 2007; "Görüntü Analiz Yöntemleri İle Kayaçların Yapısal Özelliklerinin Tanımlanması", Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 27.
- Katsabanis, T., 1999; "Calibration of optical digital fragmentation measuring systems". In Proc ISEE 25th Ann Conf Expl & Blasting Techn., (2), 325-332.
- Kemeny, J. M., 1994; "Practical Technique For Determining The Size Distribution Of Blasted Benches, Waste Dump And Heap Leach Sites", Mining Engineering, **46 (11)**, 1281-1284.
- Kleine, T. H.ve Cameron, A. R., 1996; "Blast Fragmentation Measurement Using Goldsize", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 83-89.
- Kuznetsov, V. M. 1973; "The Mean Diameter of The Fragments Formed byBlasting Rock", Soviet Minin Science, **9(2)**, 144-148.
- Latham, J.P., Kemeny, J., Maerz, N., Noy, M., Schleifer, J., Tose, S., 2003; "A Blind Comparison Between Results Of Four Image Analysis Systems Using A Photo-Library Of Piles Of Sieved Fragments"Int J Fragmentation by Blasting, (7), 105-132.
- Lilly, P. A., 1986; "An Empirical Method of Assessing Rock Mass Blastability", In ProcLarge Open Pit Mining Conference, 89-92.
- Liu, Q. ve Tran H. 1996; "Comparing systems – Validation of Fragscan, WipFrag and Split. In Measurement of Blast Fragmentation", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 151,155.
- Mackenzie, A., 1967; "Optimum Blasting". Twenty-Eighth Annual Mining Symposium. University of Minnesota, Minneapolis, 181-188.
- Maerz, N. H., Palangio, T. C.ve Franklin, J. A., 1996; "WipFrag Image Based Granulometry System", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 91-98.
- Muhammad, A. R., 2009; "The Effect of Fragmentation Specification on Blasting Cost", Master of Science Thesis, Queen's University , 38-38.
- Nielsen, K. ve Kristiansen, J., 1996; "Blasting-Crushing-Grinding: Optimisation of an Integrated Comminution System". Rock Fragmentation by Blasting, Mohanty (editör), Balkema, -Rotterdam.
- Nielsen, K., 1999; "Mine through Mill reconciliation. Can we really make it happen". MINNBLAST 99. Minnesota, June 7-11, 1999.
- Ouchterlony, F. 2005; "The Swabrec Function: Linking Fragmentation By Blasting And Crushing. Inst. Min. Metall A . **114**: A29–A44.
- Raina, A. K., Choudhury, P. B., Ramulu, M., Chakraborty, A. K., Dudhankar, A. S.,2002; "Fragalyst – An İndigenous Digital Image Analysis System For Grain Size Measurement in Mines" Journal of The Geological Society of India, **59**, 561-569.
- Rosin, P. ve Rammler, E., 1933; "The Laws Governing The Fineness Of Powdered Coal" *J Inst Fuel*, (7), 29-36.
- Schleifer, J.ve Tessier, B., 1996; "FRAGSCAN A Tool To Measure Fragmentation Of Blasted Rock", Measurement of Blast Fragmentation, Franklin, J. A. ve Katsabanis P. D., (Editör), 73-78.
- Tunstall A. M. ve Bearman, R.A., 1997; "Influence of fragmentation on crushing performance". Mining Engineering, January 1997.
- Workman, L. ve Eloranta, J. 2003; " The effects of blasting on crushing and grinding efficiency and energy consumption". In *Proc ISEE 29th Ann Conf Expl & Blasting Techn*, **1**, 131-140.

## DOGALTAŞ NİHAİ ÜRÜNLERİNİN KAYMA AÇISINI ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

### Statistical Analysis of Final Product Natural Stone Parameters Affecting Slip Angle

Geliş (received) 06 Ekim (October) 2009; Kabul (accepted) 11 Ocak (January) 2010

Ali SARIİŞİK (\*)  
Gencay SARIİŞİK (\*\*)

### ÖZET

Çalışma, çıplak ayakla yürünen yüzeylerde kullanılan doğaltaşların, kayma emniyetinin yüksek olması istenilen alanlarda, yayaların emniyetini artırıcı uygun yüzey işlemlerinin belirlenmesi için yapılan bir araştırmadır. Bu çalışmada, yüzeyleri işlenmiş doğaltaşların zemin kaplama malzemesi olarak kullanılmasında, önemli bir parametre olan kayma açısı DIN 51097 "Çıplak Ayakla Gezilen Islak Bölgelerin Kaymayı Önleme Özelliğinin Belirlenmesi" Standardı kullanılarak saptanmıştır. Oluşumlarına göre sınıflandırılmış 16 farklı tür doğaltaşın, farklı boyutlarda ve farklı yüzey işleme tekniklerinde, eğik düzlem yöntemiyle kayma açıları belirlenmiştir. Doğaltaş plakaların kayma açısı değerlerini etkileyen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü, plaka boyutları, yüzey işlemede kullanılan abrasivlerin tane boyutları, fiziksel ve mekanik özellikler olduğu tespit edilmiştir. Bu parametreler arasındaki ilişkiyi belirlemek için istatistiksel analiz yapılmıştır. Doğaltaş plakaları, belirlenen istatistiksel analiz sonuçları dikkate alınarak kayma açısı ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak, kullanım yerlerine göre sınıflandırılmıştır.

**Anahtar sözcükler:** Doğaltaş, Kayma Emniyeti, Kayma Açısı, Yüzey Pürüzlülük

### ABSTRACT

This study was conducted in order to determine the suitable surface processing techniques which will increase the safety of barefoot pedestrians, reducing the risk of slipping on wet floor coverings. In the scope of the study, slip angle of surface-processed natural stones is determined by using DIN 51097 Standard "The determination of the characteristics that reduce slipping on wet, barefoot surfaces". Slip angle was calculated with the help of an inclined plane method and by using three different surface processing techniques (polishing, hanning and tumbling techniques) for 16 different types of natural stone. It was found that the parameters which affected slip angle values of the natural stones were surface roughness, plate sizes, grain size of the abrasives used for surface processing, physical and mechanical properties. Statistical analysis was used to determine the relationship between these parameters. The natural stones were then grouped in view of safe utilization places depending on slip angle and surface roughness, according to the statistical results.

**Keywords:** Natural Stone, Slip Safety, Slip Angle, Surface Roughness

---

(\*)Yrd. Doç. Dr., Afyon Kocatepe Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Müh. Böl., AFYONKARAHİSAR sariisik@aku.edu.tr

(\*\*) Öğr. Gör., Afyon Kocatepe Üniversitesi, iscehisar Meslek Yüksekokulu, iscehisar/AFYONKARAHİSAR



## 1. GİRİŞ

Günümüz mimarisinde doğaltaşlar, zemin kaplama malzemesi olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. Doğaltaşların zemin kaplama malzemesi olarak kullanımında, dikkat edilecek özelliklerinden en önemlilerinden biri de kayma direncidir (Grönqvist, 1995; Rowland vd, 1996; Kim, 1996; Chang, 1999; Manning vd, 1998). Kayma direnci, çıplak ayak tabanı ile zemin kaplama malzemesi yüzeyinin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. İnsanların çıplak ayakla emniyetli hareket edebilmesi için, zemin kaplama malzemesi olarak kullanılacak doğaltaş plakaların ıslak ve kuru zeminlerde kayma emniyetinin belirlenmesi gerekmektedir. Doğaltaş plakaların kayma emniyetinin belirlenmesi için yüzeyleri işlenmiş doğaltaş plakalarının kayma açısının laboratuvar ortamında test edilmesi zorunlu olmuştur.

Doğaltaş plakalarında kayganlık, yüzey ve yüzeyle etkileşen nesnenin çekme ya da sürtünmesinden oluşan etki olarak tanımlanabilir. Adams'a göre (1997) yayaların yürürken kayma kazalarının artması, kaymayı önleme çalışmalarının önemini belirgin olarak artırmıştır. Chang'a göre (1998) kayma direncini etkileyen en önemli faktör yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzey kaplamasının pürüzlülük özelliğinin artması, kaymayı önemli bir şekilde azaltmaktadır (Chang, 1999; Chang vd, 2001; Chang, 2003; Chang vd, 2004; Manning vd, 1998; Manning ve Jones, 2001, Sarıışık vd, 2007; Sarıışık, 2009).

Doğaltaşlarda estetik görünüm sağlamak ve yürüme ortamlarında yayaların kaymalarından kaynaklanan kazaları önlemek için doğaltaş plakalarına yüzey işleme teknikleri uygulanmaktadır. Doğaltaşlara yüzey işleme tekniği uygulanmasıyla kullanım yerinde parlaklık, cila alma ve kaymazlık özellikleri direkt olarak etkilenmektedir (Sarıışık vd, 2003).

Çıplak ayakla kayma güvenliliğinin test edildiği ortamlarda, özellikle de nem ile sıklıkla etkileşen iç mekânlarda ıslak zeminde (mutfak, yemek hazırlama alanları, çamaşırhane, WC ve kuruluğu değişen diğer alanlar) kayma ihtimali yüksek olmaktadır. Bu mekânlarda sabun artıkları, mutfak yağları ve gıda maddesi gibi diğer kirlenmelerle temas eden alanların riski daha fazladır. Genellikle havuzlarda kullanılan doğaltaş plakalarında yüzey kirlenmeleri havuz

tuzlarından, şampuan artıklarından ve vücut yağlarından etkilenmekte, bunun sonucu olarak havuz etrafında kayma sonucu düşmelere neden olmaktadır (Gürcan, 2006).

Bu çalışmada kayganlık özelliği fazla olan doğaltaş plakaların honlama ve eskitme gibi yüzey işlemlerinin daha dikkatli ve standartlara göre yapılarak insanların çıplak ayakla kullandıkları alanlarda kayma riskini en aza indirmek amacıyla kullanılan zemin kaplamalarının kaymayı önleyici özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Literatürde kayma direncinin belirlenmesinde birçok farklı test cihazı kullanılmakla birlikte (Grönqvist vd, 1999; Leclercq, 1999), bu çalışmada çıplak ayakla kayma direncinin belirlenmesi eğik düzlem test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, doğaltaşların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenerek, bunların kayma açısına etkileri incelenmiştir. Fiziksel özelliklerden su emme, porozite, permeabilite ve basınç dayanımının kayma açısı ile olan bağlantısı belirlenmiştir. İncelenen literatürde, çıplak ayakla doğaltaş plakaların kayma direncini belirleyen başka bir çalışmaya rastlanmamış olması, çalışmanın değerini artırmaktadır. Kullanılan doğaltaş plakaların doğal desenlerinin, sanatsal ve görsel özelliklerinin insanlara sunulabilmesi için, kayma direnclerinin belirlendiği ve sonuçları inşaat sektöründe uygulanabildiği takdirde bu çalışma hedefine ulaşmış olacaktır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikler

Bu çalışmada numune olarak inşaat sektöründe özellikle ıslak ve nemli ortamlarda kullanılan metamorfik ve sedimanter kayalar seçilmiştir. Gerçek mermerlerden 5 adet, kireçtaşlarından 6 adet ve travertenlerden 5 adet doğaltaş test edilmiştir. Doğaltaşların fiziko-mekanik deneyleri AKÜ (TUAM) Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde, DIN EN Standartları dikkate alınarak yapılmıştır (DIN EN 1936, DIN EN 13755, DIN EN 1926, DIN 18130-1, Sarıışık, 2007). Test edilen doğaltaşların fiziko-mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

### 2.2. Kaymazlık Test Yöntemleri

1950 yıllarından sonra, kayma direncini ölçmek

için pek çok farklı test cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar pürüzsüz yüzey ya da kayma direnci, dinamik veya statik sürtünme katsayısının ölçümleri için tasarlanmıştır. Kayma direncinin belirlenmesi için; Yatay Sürtünme Ölçüm Metresi, Yatay Dinamometresi, Pull-Metre, James Makine, Pandül (Sarkaç) test cihazı ve Eğik Düzlem test cihazları geliştirilmiştir. Bu çalışmada yayaların ıslak zeminlerde kaymaya karşı emniyetini test için, eğik düzlem cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Doğaltaşların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

D	N	ÖK	SE	P	Pr	BD
M	M1	2780	1,84	2,86	1,31	70,04
	M2	2780	1,84	3,24	1,52	71,41
	M3	2790	1,79	3,58	1,63	75,30
	M4	2750	0,24	0,70	0,54	67,70
	M5	2740	0,21	0,73	0,58	68,16
K	K1	2770	0,20	0,53	2,30	85,66
	K2	2750	0,21	0,56	2,40	85,42
	K3	2690	0,24	0,64	2,70	85,78
	K4	2680	0,26	0,69	2,90	85,48
	K5	2680	0,27	0,70	2,95	85,07
	K6	2690	1,23	1,49	6,70	79,68
T	T1	2746	5,59	7,64	0,58	40,60
	T2	2650	8,83	8,47	0,71	41,67
	T3	2456	11,98	12,66	1,35	22,89
	T4	2600	6,00	6,80	0,65	45,81
	T5	2720	6,69	7,60	0,69	48,72

D: Doğaltaş Türü, M: Mermer, K: Kireçtaşı, T: Traverten, N: Numune Kodu, ÖK: Özgül Kütle (kg/m<sup>3</sup>), SE: Su Emme (%), P: Porozite (%), Pr: Permeabilite (mD x 10<sup>-2</sup>), BD: Basınç Dayanımı (MPa)

### 2.2.1. Eğik Düzlem Test Yöntemi

Eğik düzlem test yöntemi ile ıslak ve çıplak ayakla yürünen alanlardaki yer döşemelerinde kullanılan doğaltaş plakaların, kaymayı önleyici özelliklerinin saptanması ve değerlendirilmesi amacıyla "DIN 51097: Çıplak Ayakla Gezilen Islak Bölgelerin Kaymayı Önleme Özelliğinin Belirlenmesi" standardı dikkate alınmıştır. Buna göre, çıplak ayakla yürünen ıslak zeminler olarak; havuzlar, banyolar, soyunma odaları, sağlık merkezleri ve tuvalet gibi mekânlarda kullanılacak kaplama malzemelerinin kayma önleme özellikleri belirlenmektedir. DIN 51097 standardında göre kayma açıları dikkate alınarak A, B ve C şeklinde sınıflandırılmış ve kullanım alanları Çizelge 2'de verilmiştir.

Eğik Düzlem Test Cihazı, GABBRIELLI Marka, C-03463 Model, kaygan yüzeylerin dinamik sürtünme katsayılarının tayininde kullanılan bir cihazdır (Şekil 1). Eğik düzlem test cihazı yüzeylerin pürüzlülüğünü dikkate alarak kayma

direncinin, dinamik ve statik sürtünme katsayısının ölçümleri için tasarlanmıştır. Eğik düzlem test cihazında elde edilen kayma açısının tanjantı, çıplak ayak ile kaplama malzemesi yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısını vermektedir (Şekil 2) (Bowman, 1997; Miller, 1999).

Çizelge 2. Çıplak Ayakla Gezilen Islak Bölgelerin Kaymayı Önleme Özelliğinin Belirlenme Testi Sonuçlarının Sınıflandırılması (DIN 51097, 1992).

S	Uygulama Alanı	AD
A	Genellikle kuru iken yalınayak kullanılan koridorlar, Tek ya da grup soyunma odaları (sporcular için), Tüm yüzme havuzlarında, derinliği 80 cm olmayan sığ yüzme havuzlarında	≥ 12°
	A sınıflandırması içinde belirtilen alanlar dışındaki yalınayak kullanılan koridorlar, Dezenfektan spreyleri için oluşturulan alanlar,	
B	Yüzme havuzu çevresindeki alanlar, Platformlar, Çocuk havuzları, Yağmurlu alanlardaki merdivenler, Yüzme havuzu dışındaki merdiven basamakları.	≥ 18°
	Havuzların kıyı eğimlerinde, B sınıflandırmasında yer almayan su içindeki merdivenler.	
C		≥ 24°

S: Sınıflandırma, AD: Açı Değerleri

Eğik Düzlem Test Cihazı, 600 mm genişliğinde ve 2000 mm uzunluğunda, eğimi uzunlamasına 0° ile 45° arasında ayarlanabilen, düz ve eğilmeyen bir döşemeden oluşmaktadır. Testin uygulanması, esnasında doğaltaş plakaların üzerine su (6±1 l/d) beslenmektedir. Eğik düzlem cihazında test için çıplak ayakla yürünen kişi, yarım adımlar atarak ileriye ve geriye doğru, suyun aktığı yönde, yatay düzlemden başlayarak eğimi yaklaşık 1°/s değerinde artacak şekilde doğaltaş plakasının üzerinde hareket ettirilmektedir. Test için çıplak ayakla yürünen kişinin, güvenli yürüyüş sınırının sonuna ulaştığı kayma açısı, kritik bölgede en az 16 defa tekrarlanarak test edilmektedir.

### 2.3. Yüzey İşleme Yöntemleri

Doğaltaş plakaların, üç farklı plaka boyutunda honlu, cilalı ve eskitilmiş yüzeydeki kayma açısı değerlerinin değişimi belirlenmektedir. Çalışmada zemin kaplamalarında çok tercih edilen (P1) 30,5x30,5x1,0 cm, (P2) 40,0x40,0x2,0 cm ve (P3) 60,0x60,0x2,0 cm boyutları kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan doğaltaş plaka yüzeylerinin işlenmesi için tesis boyutunda cilalama ve hanlama işleminde kullanılan kalibre ve abrasif başlıkları, su miktarı, bant hızı, basınç oranı ve yüzeyin durumu Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 1. Eğik düzlem test cihazı.



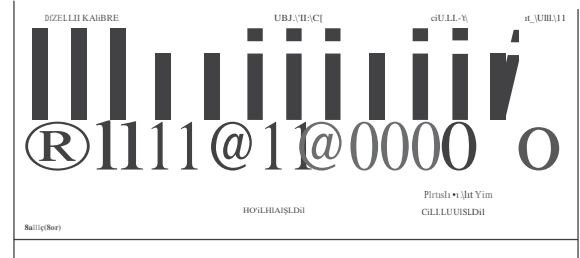
Şekil 2. Çıplak ayak ile kaplama malzemesi yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı ( $\tan \delta = F_h/F_v$ ).

#### 2.3.1. Cilalama

Cilalama işlemi temelde kontrollü bir aşındırma işlemidir. Cilalama işleminde, silim hattı ve cila hattı bulunan makineler kullanılır. Doğaltaş silim hattında, aşındırıcılar ile doğaltaş yüzeyinde kesim esnasında oluşan kesim yönündeki çizgilerin veya parçacıkların uzaklaştırılması ile yüzeyin pürüzsüz bir hale getirilme işlemi (Şekil 3) yapılmaktadır (Engin ve Kulaksız, 2007). Çalışmada DEMMAK (DCM 650-7008) marka silim hattı (3+12), kullanılmıştır.

#### 2.3.2. Honlama

Hanlama işlemi 30-320 numara abrasiv kullanılarak yapılır. Hanlama işlemi için istenilen matlık talebine göre 220, 320 numara abrasivle silim yapılır ve ardından 1. kafa hanlama keçesi ile abrasiv izleri silinir (Şekil 3). Hanlama işlemi sonucunda düz, cilalıya göre pürüzlü ve daha mat bir yüzey elde edilmektedir. Cila uygulanmış yüzeylerin istenmediği alanlarda, haniyanmış yüzey tercih edilir. Yüzey cilasız olduğu için kaymayı önleyici ve emniyetli bir yürüyüş imkanı elde edilmektedir.



Şekil 3. Doğaltaş silme ve cilalama makinelerinin şematik gösterimi (Şentürk vd, 1996).

#### 2.3.3. Eskitme

Eskitilmiş yüzey, doğaltaş yüzeylerinin aşındırıcılar ile uzun sürede işleme sürecidir. Doğaltaş parçaları su ve aşındırıcı parçacıklarla beraber eskitme teknesinin içine konular ve makinenin çeşitli mekanik hareketleri sonucunda aşındırıcılı sulu karışımla karışarak aşınır. Doğaltaş parçaları titreşim, salınım, çalkalama hareketleri yapan teknenin içinde değişik formlarda aşındırıcı, kimyasal veya metal malzemelerle birlikte işleme tabi tutulmaktadır. Eskitme işleminde aşınma kenar ve köşeleri

daha fazla etkilemektedir (Engin, 2007). Çalışmada kullanılan doğaltaşlar KROMAŞ (VM Y 900) marka 1800 litre kapasiteli, tambur tipi makinelerde 15-20 dakika çalkalanarak eskitme yapılmıştır.

## 2.4 Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Çalışmada honlu, cilalı ve eskitilmiş doğaltaş plakaların yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için Perthometer M2 marka Yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. DIN EN ISO 4287 standardına göre çalışan bu cihazda 59 tarama aralığında, 1,75, 5,60 ve 17,5 mm tarama boyu ile kullanılmaktadır. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde en büyük tarama boyu olan 17,5 mm'lik tarama boyu kullanılmıştır. Doğaltaş numunelerinde öncelikle yüzey üzerinde düşey olarak 30 mm mesafeli 10 ölçüm hattı belirlenmiştir. Sonra her bir doğaltaş numune için, 10 tane yüzey pürüzlülük(Rz) değeri ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 3'de ıslak ortamlarda yüzey pürüzlülük test sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3. Islak Ortamlarda Yüzey Pürüzlülük Test Sonuçları (Carpenter vd, 2006; Bowman, 2003)

Yüzey pürüzlülüğü, Rz (I-ım)	Kayma potansiyeli
.....10	yüksek (Y)
10 -20	orta (O)
20-30	düşük (D)
>30	çok düşük (Ç)

## 3. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

### 3.1. Doğaltaş Plakaların Kayma Açısı Analizi

Deneyleerde kullanılan cilalanmış, hanianmış ve eskitilmiş doğaltaş plakaların zemin kaplamalarında çokça tercih edilen P1, P2 ve P3 plaka boyutlarındaki kayma açısı değerlerinin istatistiksel analizi yapılmıştır. Mermer, kireçtaşı ve travertenlerde 10 tane kayma açısı değeri ile üç faktörlü varyans (ANOVA) analizi (16 doğaltaş x 3 plaka boyutu x 3 yüzey işleme) uygulanmıştır. Toplamda mermerlerde 450 veri, kireçtaşlarında 540 veri ve travertende 450 veri kullanılmıştır. Doğaltaş plakalarda kayma açısı bakımından  $p < 0,001$  anlamlılık düzeyinde tüm boyutlar ve yüzey işlemler arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğaltaş

plakalarının zemin kaplamaları kullanımında plaka boyutları ve yüzey işlemlerinin etkili olduğu görülmüştür.

### 3.1.1. Mermer Plakaların Kayma Açısı Analizi

Mermer plakaların cilalı, honlu ve eskitilmiş yüzeylerde kayma açısının plaka boyutlarına ve yüzey işlemlerine göre istatistiksel analizi Çizelge 4'de, kayma açısı değerleri ise Şekil 4'de verilmektedir.

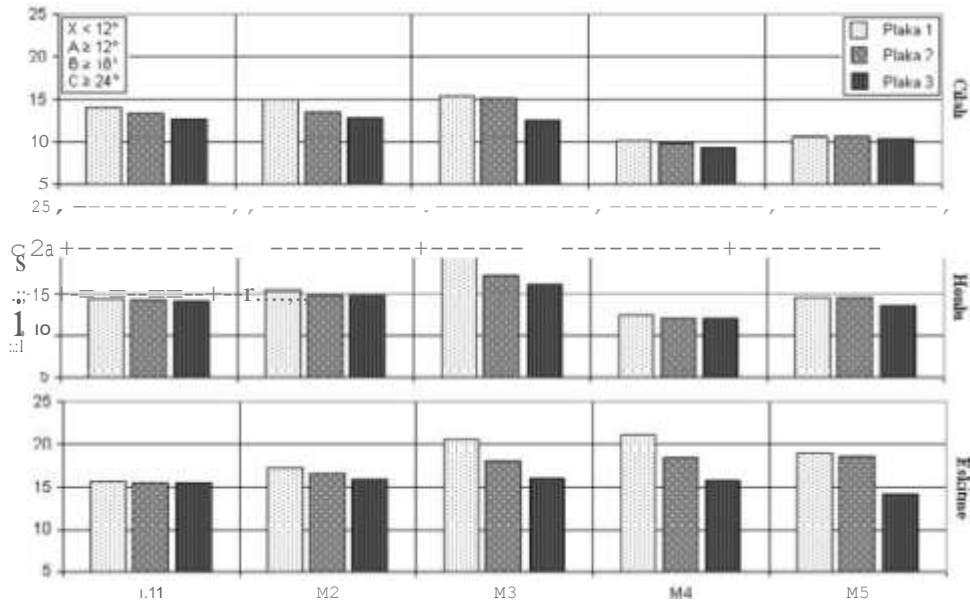
Cilalanmış tüm boyutlarda M4 ve M5 numunelerinde kayma açıları en düşük değerde olduğu görülmektedir. M4 ve M5 numunelerinin aritmetik ortalama değerleri sırası ile  $10,04^\circ$  ve  $10,72^\circ$  iken, standart sapmaları  $0,63^\circ$  ve  $0,50^\circ$ 'dir. Buna göre kayma emniyetleri en düşük değerdedir. Buna karşın P1, P2 plaka boyutlarında M1, M2 ve M3 numunelerin kayma açısı, kayma emniyeti sınıflandırmasında emniyetli durumdadır. M3 numunesi, P1 boyutunda  $15,57^\circ$  aritmetik ortalama ve  $0,52^\circ$  standart sapma değeri ile en yüksek kayma açısı değerindedir. Cilalı yüzeylerde tüm plaka boyutlarında M1, M2 ve M3 numuneleri en yüksek kayma açısına sahip olduğu için bu üç mermer türü tercih edilebilir.

Yüzeyleri hanianmış mermer plakaların kayma açısı, tüm plakalarda emniyetli durumdadır. M3 numunesi ise özellikle P1 boyutunda diğer numunelerden farklı olarak  $20,32^\circ$  aritmetik ortalama ve  $0,49^\circ$  standart sapma değeri ile en yüksek kayma açısı değerindedir. Çıplak ayakla emniyetli kullanılabilecek mermer yüzeyi, honlu yüzeyler olabilir. Plakaların kullanımı esnasında derz aralıkları kayma açısını yükselttiğinden, çıplak ayakla insanların yürüebileceği emniyetli zeminler oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Özellikle P1, P2 boyutlarındaki kayma açısı değeri P3 plaka boyutundaki kayma açısı değerinden yüksektir.

Mermer plakalarında eskitilmiş yüzeylerde P1 plaka boyutunda kayma açısının en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Özellikle M4 numunesi P1 plaka boyutunda  $21,11^\circ$  aritmetik ortalama ve  $0,43^\circ$  standart sapma ile en yüksek değeri almıştır. Çalışmanın bu bölümündeki sonuçlardan, mermer yüzeylerinin tambur tipi makinelerde 15-20 dakika abrasivler ile eskitildiğinde, kayma açısı değerinin arttığı, buna bağlı olarak da kayma emniyetinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 4. Merrnerlerin Plaka Boyutu ve Yüzey İşlemlerine Göre Kayma Açısının İstatistiksel Analizi

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)	Bağımsız Değişken Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlılık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
						Altlimit	Üst limit
Kayma Açısı	Plaka 1	Plaka 2	0,9780*	0,17118	<0,001	0,6416	1,3144
		Plaka 3	2,0633*	0,17118	<0,001	1,7269	2,3998
	Plaka 2	Plaka 1	-0,9780*	0,17118	<0,001	-1,3144	-0,6416
		Plaka 3	1,0853*	0,17118	<0,001	0,7489	1,4218
	Plaka 3	Plaka 1	-2,0633*	0,17118	<0,001	-2,3998	-1,7269
		Plaka 2	-1,0853*	0,17118	<0,001	-1,4218	-0,7489
Kayma Açısı	Cilalı	Honlu	-2,2373*	0,17118	<0,001	-2,5738	-1,9009
		Eskitme	-4,9273	0,17118	<0,001	-5,2638	-4,5909
	Honlu	Cilalı	2,2373*	0,17118	<0,001	1,9009	2,5738
		Eskitme	-2,6900*	0,17118	<0,001	-3,0264	-2,3536
	Eskitme	Honlu	4,9273*	0,17118	<0,001	4,5909	5,2638
		Cilalı	2,6900*	0,17118	<0,001	2,3536	3,0264



Şekil 4. Cilalı, honlu ve eskitilmiş mermer plakaların kayma açısı değerleri.

### 3.1.2. Kireçtaşı Plakalarının Kayma Açısı Analizi

Kireçtaşlarının cilalı, honlu ve eskitilmiş yüzeylerde kayma açısının plaka boyutlarına ve yüzey işlemlerine göre istatistiksel analizi Çizelge 5'de, kayma açısı değerleri ise Şekil 5'de verilmektedir. Cilalı yüzeylerde P2, P3 plaka boyutlu K5 numunesi sırası ile 11,03° ve 10,68° aritmetik ortalama ve 0,22°, 0,57° standart sapma değeriyle en düşük kayma açısına sahiptir. Kayma açısı en düşük değerde olduğu için ıslak zemin kaplamada kullanılması uygun değildir. Buna karşın P2, P3 plaka boyutlarında K5 numunesi ve tüm boyutlardaki K2 numunesi

hariç diğer kireçtaşlarının kullanımı uygun olmaktadır. Cilalı yüzeylerde 14,65° aritmetik ortalama ve 0,44° standart sapma ile en yüksek kayma açısı K6 numunesinde belirlenmiştir. Cilalanmış yüzeylerde P1 plaka boyuttaki kireçtaşları içinde kayma açısı yüksek olan K1, K3, K4 ve K6 numuneleri tercih edilebilir.

Yüzeyleri hanilanmış kireçtaşlarının kayma açısı, P1 plaka boyutlarında kullanımı için uygundur. P2, P3 plaka boyutlarında K2 numuneleri sırası ile 11,29°, 11,09° aritmetik ortalama ve 0,33°, 0,45° standart sapma değeriyle en düşük kayma açısına sahiptir. Honlu yüzeylerde P1 plaka boyutunda K6 numunesi 16,04° aritmetik

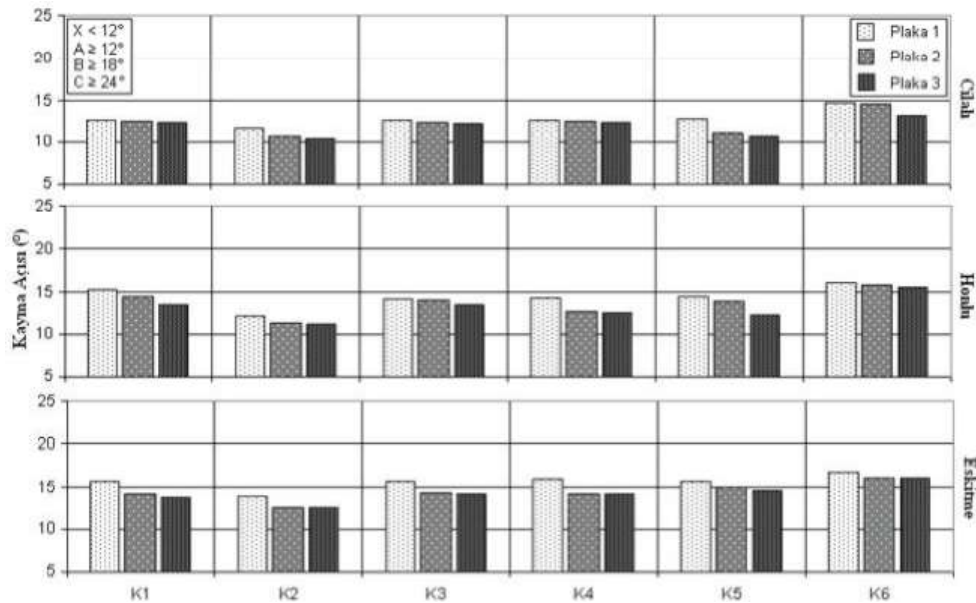
ortalama ve 0,62° standart sapma değeriyle en yüksek kayma açısına sahiptir. Yüzeyleri honlanmış kireçtaşı zemin kaplamaları, tüm plaka boyutlarında çıplak ayakla emniyetli olarak kullanılabilir. Plakaların kullanımı esnasında derz boşlukları kayma açısını yükseltmektedir. Buna göre özellikle P1, P2 boyutlarındaki kayma açısı değerleri, P3 plaka boyutundaki kayma açısı değerlerinden yüksektir.

Kireçtaşlarında eskitilmiş yüzeylerde P1 plaka boyutunda kayma açısının en yüksek değerlere

ulaştığı görülmüştür. Eskitilmiş yüzeylerden P3 plaka boyutunda aritmetik ortalaması 13,62° ve standart sapması 0,46° olan K1 kireçtaşı en düşük kayma açısına sahipken, K6 numunesi P1 plaka boyutunda 16,68° aritmetik ortalama ve 0,34° standart sapmayla en yüksek kayma açısına sahiptir. Tüm plaka boyutu arasındaki en küçük ile en büyük kayma açısı arasındaki açı değeri 6,47° olarak belirlenmiştir. Eskitilmiş yüzeylerde P3 plaka boyutlarında kayma açısı değerleri azalmıştır.

Çizelge 5. Kireçtaşı Plaka Boyutu ve Yüzey İşlemlerine Göre Kayma Açısının İstatistiksel Analizi

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)	Bağımsız Değişken Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlılık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
						Alt limit	Üst limit
Kayma Açı	Plaka 1	Plaka 2	0,8739*	0,08464	<0,001	0,6749	1,0728
		Plaka 3	1,1078*	0,08464	<0,001	0,9088	1,3067
		Plaka 2	-0,8739*	0,08464	<0,001	-1,0728	-0,6749
	Plaka 2	Plaka 3	0,2339*	0,08464	<0,001	0,0349	0,4328
		Plaka 1	-1,1078*	0,08464	<0,001	-1,3067	-0,9088
	Plaka 3	Plaka 2	-0,2339*	0,08464	<0,001	-0,4328	-0,0349
Kayma Açısı	Cilalı	Honlu	-1,2917*	0,08464	<0,001	-1,4906	-1,0927
		Eskitme	-2,3000*	0,08464	<0,001	-2,4989	-2,1011
	Honlu	Cilalı	1,2917*	0,08464	<0,001	1,0927	1,4906
		Eskitme	-1,0083*	0,08464	<0,001	-1,2073	-0,8094
	Eskitme	Honlu	2,3000*	0,08464	<0,001	2,1011	2,4989
		Cilalı	1,0083*	0,08464	<0,001	0,8094	1,2073



Şekil 5. Cilalı, honlu ve eskitilmiş kireçtaşı plakalarının kayma açısı değerleri

### 3.1.3. Traverten plakalarının kayma açısı analizi

Travertenlerin cilalı, honlu ve eskitilmiş yüzeylerde kayma açısının plaka boyutlarına ve yüzey işlemlerine göre istatistiksel analizi Çizelge 6'da, kayma açısı değerleri ise Şekil 6'da verilmektedir. Cilalı yüzeylerde T3 numunesi P1 plaka boyutunda 16,65° kayma açısı değeri ile en yüksek kayma açısı değerine sahiptir. Cilalanmış yüzeylerde P3 plaka boyutunda T1 numunesinin 13,94° aritmetik ortalama ile en düşük kayma açısı değerine sahip olduğu görülmektedir. Buna göre kayma emniyetleri en düşük değerdedir.

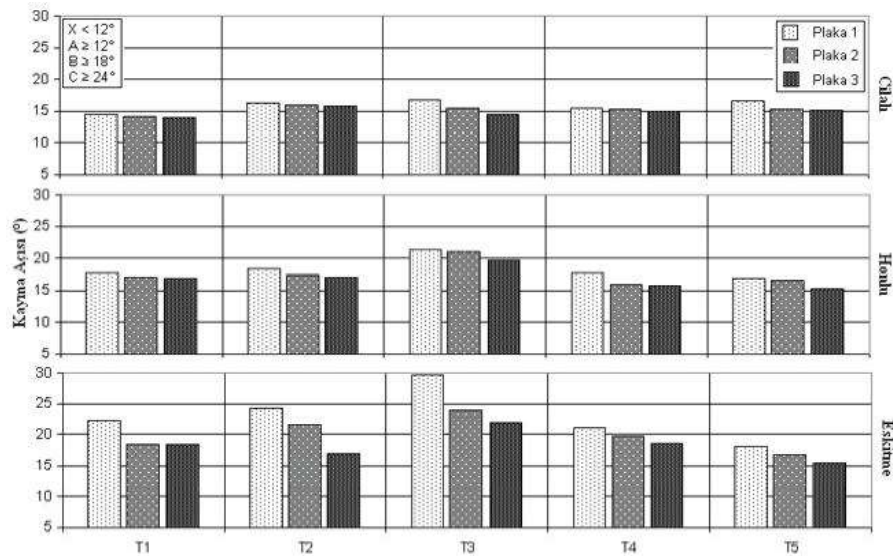
Yüzeyleri honlanmış traverten plakaların kayma açısı, mermer ve kireçtaşı plakalarına göre yüksektir. T5 numunesi özellikle P3 plaka boyutunda diğer traverten plakalardan farklı

olarak 15,36° aritmetik ortalama ve 0,50° standart sapma ile en düşük kayma açısına sahiptir. P1 plaka boyutunda en yüksek kayma açısına 21,43° aritmetik ortalama ve 0,42° standart sapma ile T3 numunesi sahiptir.

Travertenlerde eskitilmiş yüzeylerde P1 plaka boyutunda kayma açısının en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Buna göre P1 plaka boyutunda 29,72° aritmetik ortalama ve 0,61° standart sapma ile en yüksek kayma açısına T3 numunesi sahiptir. En düşük kayma açısına P3 plaka boyutunda 15,43° aritmetik ortalama ve 0,36° standart sapma ile T5 numunesi sahiptir. Eskitilmiş yüzeylerde P3 plaka boyutlarında kayma açısı değerleri azalmıştır. Çalışmada, çıplak ayakla yürünecek ıslak zeminler için eskitilmiş travertenlerde, küçük plaka boyutlarının zemin kaplamalar için daha güvenli olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6. Traverten Plaka Boyutu ve Yüzey İşlemlerine Göre Kayma Açısının İstatistiksel Analizi

Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)	Bağımsız Değişken Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlılık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
						Alt limit	Üst limit
Kayma Açısı	Plaka 1	Plaka 2	1,9075*	0,23873	<0,001	1,3461	2,4689
		Plaka 3	1,4162*	0,23873	<0,001	0,8548	1,9776
	Plaka 2	Plaka 1	-1,9075*	0,23873	<0,001	-2,4689	-1,3461
		Plaka 3	-0,4913*	0,23873	<0,001	1,3461	0,0701
	Plaka 3	Plaka 1	-1,4162*	0,23873	<0,001	-1,9776	-0,8548
		Plaka 2	0,4913*	0,23873	<0,001	1,3461	1,0527
Kayma Açısı	Cilalı	Honlu	-2,2687*	0,23873	<0,001	-2,8301	-1,7073
		Eskitme	-2,2687*	0,23873	<0,001	-5,7281	-4,6053
	Honlu	Cilalı	-2,2687*	0,23873	<0,001	1,7073	2,8301
		Eskitme	-2,8980*	0,23873	<0,001	-3,4594	-2,3366
	Eskitme	Honlu	5,1667*	0,23873	<0,001	4,6053	5,7281
		Cilalı	2,8980*	0,23873	<0,001	2,3366	3,4594



Şekil 6. Cilalı, honlu ve eskitilmiş traverten plakalarının kayma açısı değerleri.

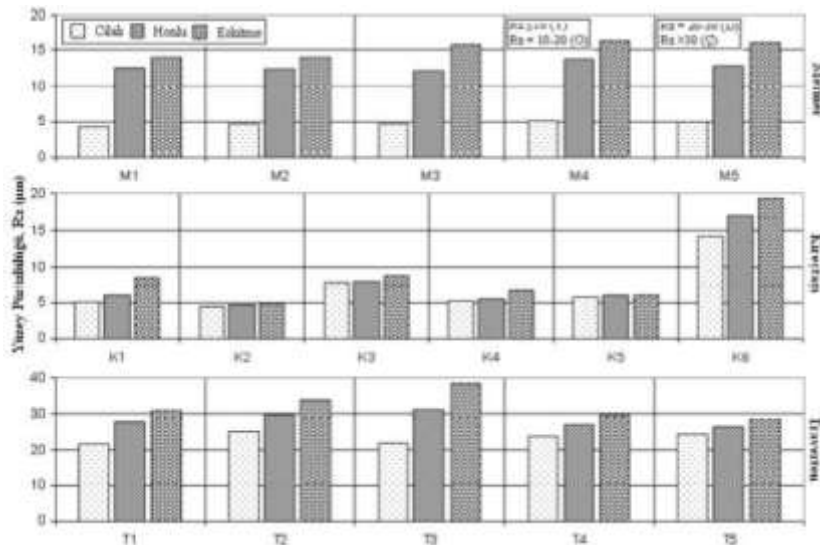
### 3.2. Doğaltaşların yüzey pürüzlülük analizi

Deneysel olarak, zemin kaplamalarında kullanılan doğaltaş plakalarının cilalanmış, honlanmış ve eskitilmiş yüzey pürüzlülüğü değerlerinin istatistiksel olarak analizi yapılmış ve analiz sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir. Mermer, kireçtaşı ve traverten plakalarında 10 tane yüzey pürüzlülük (Rz) değeri ile iki faktörlü varyans (ANOVA) analizi (16 doğaltaş x 3 yüzey işleme) uygulanmıştır. Toplamda mermerlerde 150 veri, kireçtaşlarında 180 veri ve travertende 150 veri kullanılmıştır. Doğaltaş plakalarında kayma açısı bakımından  $p < 0,001$  anlamlılık düzeyinde yüzey işlemler arasında istatistiksel olarak anlamlı fark vardır. Buna göre doğaltaş plakalarının zemin kaplamalarında kullanımında yüzey işlemlerinin etkili olduğu görülmüştür.

Tüm doğaltaş numunelerinin cilalı yüzeylerinde Rz değeri 10  $\mu\text{m}$ ’dan küçük olduğu için kayma potansiyeli çok yüksek seviyededir. Honlu ve eskitilmiş yüzeylerde ise Rz değeri 10–20  $\mu\text{m}$  arasında olduğu için kayma potansiyeli orta, 20–30  $\mu\text{m}$  arasında kayma potansiyeli düşük, >30  $\mu\text{m}$ ’da ise kayma potansiyeli çok düşük seviyededir. Doğaltaş plakalarında cilalı yüzeylerde Rz değeri daha düşük iken, honlanmış ve eskitilmiş yüzeylerdeki Rz değeri cilalıya göre artış göstermiştir. Buna göre her üç gruptaki doğaltaş plakalarında yüzey pürüzlülüğü arttıkça, kayma açısı artmaktadır. Şekil 7’de görüldüğü gibi en yüksek kayma açısı ve yüzey pürüzlülük değeri traverten plakalarında gözlemlenmektedir.

Çizelge 7. Doğaltaş Plakalarının Yüzey İşlemlerine Göre Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Analizi

Doğaltaş Numuneler	Bağımlı Değişken	Bağımsız Değişken (I)	Bağımsız Değişken (J)	Bağımsız Değişken Farkı (I-J)	Standart Hata	Anlamlılık Düzeyi	95% Güven Aralığı	
							Alt limit	Üst limit
Mermer	Yüzey Pürüzlülüğü	Cilalı	Honlu	-9,1354*	0,09479	<0,001	-9,3217	-8,9491
			Eskitme	-11,4056*	0,09479	<0,001	-11,5919	-11,2193
		Honlu	Cilalı	9,1354*	0,09479	<0,001	8,9491	9,3217
			Eskitme	-2,2702*	0,09479	<0,001	-2,4565	-2,0839
		Eskitme	Honlu	11,4056*	0,09479	<0,001	11,2193	11,5919
			Cilalı	2,2702*	0,09479	<0,001	2,0839	2,4565
Kireçtaşı	Yüzey Pürüzlülüğü	Cilalı	Honlu	-1,0250*	0,35951	<0,001	-1,8699	-0,1800
			Eskitme	-2,2382*	0,35951	<0,001	-3,0832	-1,3933
		Honlu	Cilalı	1,0250*	0,35951	<0,001	0,1800	1,8699
			Eskitme	-1,2132*	0,35951	<0,001	-2,0582	-0,3683
		Eskitme	Honlu	2,2382*	0,35951	<0,001	1,3933	3,0832
			Cilalı	1,2132*	0,35951	<0,001	0,3683	2,0582
Traverten	Yüzey Pürüzlülüğü	Cilalı	Honlu	-1,1740*	0,42780	<0,001	-2,1800	-0,1680
			Eskitme	-2,5789*	0,42780	<0,001	-3,5849	-1,5728
		Honlu	Cilalı	1,1740*	0,42780	<0,001	0,1680	2,1800
			Eskitme	-1,4049*	0,42780	<0,001	-2,4109	-0,3989
		Eskitme	Honlu	2,5789*	0,42780	<0,001	1,5728	3,5849
			Cilalı	1,4049*	0,42780	<0,001	0,3989	2,4109



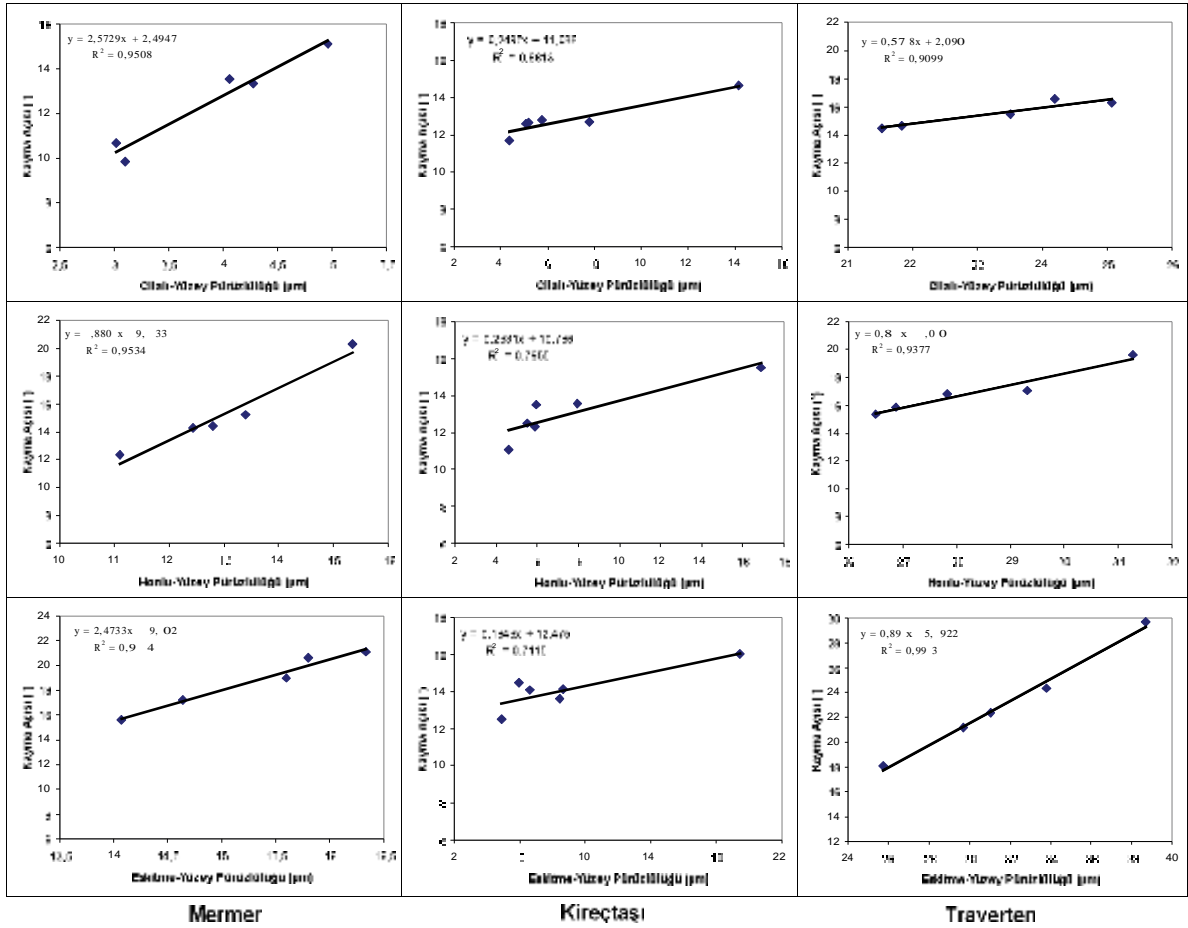
Şekil 7. Cilalı, honlu ve eskitilmiş doğaltaş plakaların yüzey pürüzlülük değerleri.



### 3.3. Doğaltaş Plakaların Yüzey Pürüzlülük ve Kayma Açısı Analizi

Doğaltaş plakalarda üç farklı boyutta kayma açısı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri arasında basit doğrusal regresyon yapılmıştır. Şekil 8'de mermer, kireçtaşı ve traverten grubunda yüzey pürüzlülüğünün, yüzey işlemlerine bağlı

olarak değişimi verilmiştir. Buna göre mermer plakalarda  $R^2 > 0,95 - 0,97$ , kireçtaşlarında  $R^2 > 0,71 - 0,88$  ve travertenlerde  $R^2 > 0,90 - 0,99$  aralığında regresyon katsayıları hesaplanmıştır. Kayma açısı ile cilalı, honlu ve eskitilmiş doğaltaş plakaların yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı bir ilişki olduğu görülmektedir

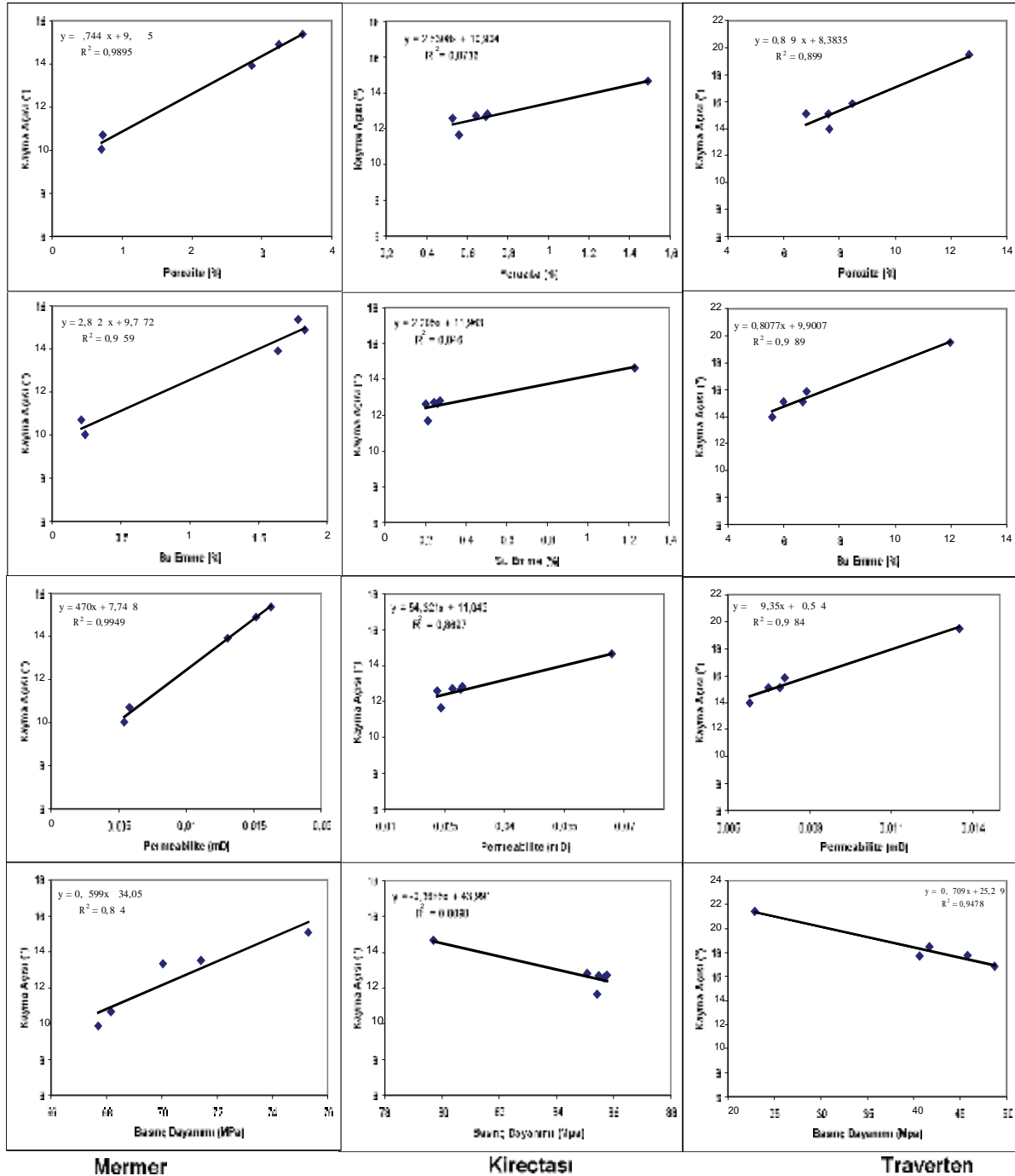


Şekil 8. Doğaltaşların kayma açısı ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki regresyon modeli.

### 3.4. Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Kayma Açısına Etkisi

Çalışmada doğaltaş plakaların fiziksel ve mekanik özelliklerinden su emme, porozite, permeabilite ve basınç dayanımının kayma açısına olan etkileri basit regresyon analizi ile incelenmiştir. Şekil 9'da kayma açısı ve fiziksel özelliklerin arasındaki basit regresyon modeli sonuçları verilmiştir. Buna göre mermerlerde  $R^2 > 0,86-0,99$ , kireçtaşlarında  $R^2 > 0,80-0,87$  ve travertenlerde  $R^2 > 0,90-0,97$  bağıntılan regresyon modeli değişimini açıklamakta önemli

bir belirleyicilik katsayısına sahiptir. Kayma açısı ile cilalı, honlu ve eskitilmiş doğaltaş plakaların fiziksel ve mekanik özellikleri arasında yüksek bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu değere göre kayma açısı ile su emme, porozite, permeabilite ve basınç dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Buna göre mermerlerde su emme, porozite ve permeabilite oranı arttıkça, kayma açısı da artmaktadır. Basınç dayanımı arttıkça kayma açısı azalmaktadır. Bu nedenle su emme, porozite ve permeabilite arttıkça kayma açısı artacak, yüzeyin kayma riski azalacaktır.



Şekil 9. Doğaltaşların kayma açısı ile fiziksel mekanik özellikler arasındaki basit regresyon modeli.

### 3.5. Doğaltaş Plakaların Kayma Açısı ve Yüzey Pürüzlülük Değerlerine Göre Sınıflandırması

Doğaltaş plakalarında DIN 51097 standardına göre yapılan testler sonucunda kayma açısı belirlenmiştir. Çizelge 2'deki "Çıplak ayakla Gezilen Islak Bölgelerin Kaymayı Önleme

Özelliklerinin Belirlenmesi" DIN 51097 standardı ve Çizelge 3'deki yüzey pürüzlülük Rz (µm) sınıflandırması dikkate alınarak, elde edilen değerlere göre hangi doğaltaşların hangisi sınıflama içinde yer aldığı Çizelge 8'de verilmektedir.

Çizelge 8. Doğaltaşların Kayma Açısı ve Yüzey Pürüzlülüğüne Göre Sınıflandırılması

Memmerler		M1		M2		M3		M4		M5			
		Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf		
Cilalı	P1	13,92	A	14,91	A	15,37	A	10,04	X	10,72	X		
	P2	13,34	A	13,52	A	15,08	A	9,85	X	10,65	X		
	P3	12,68	A	12,82	A	12,48	A	9,25	X	10,56	X		
	Rz	4,28	Y	4,70	Y	4,85	Y	5,10	Y	5,02	Y		
Honlu	P1	14,27	A	15,25	A	20,32	B	12,35	A	14,40	A		
	P2	14,05	A	14,71	A	18,87	A	12,02	A	14,35	A		
	P3	13,98	A	14,65	A	15,92	A	12,00	A	13,48	A		
	Rz	12,44	O	12,40	O	12,05	O	13,70	O	12,80	O		
Eskitme	P1	15,62	A	17,21	A	20,63	B	21,11	B	19,00	B		
	P2	15,55	A	16,56	A	18,04	B	18,54	B	18,66	B		
	P3	15,44	A	15,90	A	16,13	A	15,76	A	14,09	A		
	Rz	14,07	O	14,04	O	15,80	O	16,34	O	16,00	O		
Kireçtaşları		K1		K2		K3		K4		K5		K6	
		Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf
Cilalı	P1	12,60	A	11,67	X	12,71	A	12,66	A	12,80	A	14,65	A
	P2	12,45	A	10,71	X	12,31	A	12,51	A	11,03	X	14,46	A
	P3	12,35	A	10,42	X	12,20	A	12,38	A	10,88	X	13,16	A
	Rz	5,09	Y	4,35	Y	7,77	Y	5,20	Y	5,76	Y	14,16	O
Honlu	P1	15,19	A	12,15	A	14,11	A	14,24	A	14,32	A	16,04	A
	P2	14,32	A	11,29	X	13,89	A	12,60	A	13,78	A	15,74	A
	P3	13,49	A	11,09	X	13,56	A	12,49	A	12,29	A	15,53	A
	Rz	5,96	Y	4,63	Y	7,98	Y	5,50	Y	5,91	Y	16,89	O
Eskitme	P1	15,62	A	13,82	A	15,59	A	15,86	A	15,58	A	16,68	A
	P2	14,04	A	12,51	A	14,27	A	14,11	A	14,86	A	16,13	A
	P3	13,62	A	12,48	A	14,12	A	14,08	A	14,48	A	16,04	A
	Rz	8,45	Y	4,88	Y	8,65	Y	6,60	Y	5,95	Y	19,40	O
Travertenler		T1		T2		T3		T4		T5			
		Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf	Kayma Açısı	Sınıf		
Cilalı	P1	14,49	A	16,29	A	16,65	A	15,50	A	16,51	A		
	P2	14,12	A	16,04	A	15,54	A	15,32	A	15,38	A		
	P3	13,94	A	15,84	A	14,51	A	15,08	A	15,09	A		
	Rz	21,52	D	25,07	D	21,84	D	23,51	D	24,20	D		
Honlu	P1	17,69	A	18,48	B	21,43	B	17,78	A	16,84	A		
	P2	17,02	A	17,41	A	20,98	B	16,10	A	16,61	A		
	P3	16,82	A	17,04	A	19,61	B	15,86	A	15,36	A		
	Rz	27,82	D	29,32	D	31,26	C	26,87	D	26,50	D		
Eskitme	P1	22,41	B	24,33	C	29,72	C	21,15	B	18,07	B		
	P2	18,56	B	21,72	B	24,02	C	19,74	B	16,65	A		
	P3	18,49	B	16,81	A	22,07	B	18,65	B	15,43	A		
	Rz	31,02	C	33,79	C	38,71	C	29,71	D	28,73	D		

P1: 30.5x30.5x1 cm, P 2: 40x40x2 cm, P 3: 60x60x2 cm, Rz: Yüzey pürüzlülüğü, Y: Yüksek, O: Orta, D: Düşük, Ç: Çok Düşük

Çalışmada kullanılan doğaltaş plakaların cilalanmış yüzeylerinde P1, P2 ve P3 plaka boyutunda olan M1, M2, M3 numuneleri, K1, K2, K3, K5 numuneleri ve T1, T2, T3, T4, T5 numunelerinin kayma açısı değerleri 12° den büyük olduğu için A sınıfında yer almaktadır. Bu doğaltaş plakalar genellikle kuru, çıplak ayakla kullanılan koridorlarda, sporcu soyunma odalarında, derinliği 80 cm'yi geçmeyen sığ yüzme havuzlarında emniyetli bir şekilde kullanılabilir. Cilalı yüzeylerde tüm mermer numuneleri ve kireçtaşlarında K6 numunesi hariç diğer numunelerin yüzey pürüzlülüğü 10 µm'den düşük olduğu için kayma potansiyeli yüksek seviyededir. Cilalı yüzeylerde traverten numunelerinde yüzey pürüzlülüğü 20–30 µm

arasında olduğu için kayma potansiyeli düşük seviyededir. M4, M5 numuneleri ve K2, K5 numuneleri cilalanmış yüzeylere sahip gruptaki kullanılan plakaboyutlarında X sınıflandırmasında yer aldığı için ıslak zeminlerde emniyet açısından kullanılmamalıdır.

Honlanmış yüzeyler incelendiğinde mermer numunelerin P1 plaka boyutunda M3 numunesi haricindeki numunelerin kayma açısı değeri A sınıflandırmasında yer almaktadır. Kireçtaşlarında P2 ve P3 plaka boyutundaki K2 numunesi X sınıflandırmasında diğer kireçtaşı numuneleri ise A sınıflandırmasında yer almaktadır. Travertenlerde P1 plaka boyutunda T2 numunesi ve tüm plaka boyutlarında T3

numunesi B sınıflandırmasında, diğer traverten numuneleri ise A sınıflandırmasında yer almaktadır. Honlu yüzeylerde mermerlerin yüzey pürüzlülüğü cilalı yüzeylere göre artarak, 10-20 mm arasında olduğu için kayma potansiyeli orta seviyededir. Kireçtaşlarında K6 numunesi haricindeki numunelerde kayma potansiyeli yüksek seviyede, travertenlerde ise T3 numunesi haricindeki numunelerde düşük seviyededir.

Eskitilmiş yüzeyler incelendiğinde özellikle P1 ve P2 plaka boyutlarında M3, M4, M5 numuneleri B sınıflandırmasında iken diğer numuneler A sınıfında yer almaktadır. Çalışmada kullanılan mermer ve travertenlerin yüzeylerinin eskilmesi sonucu elde edilen yeni ürünlerin B sınıflandırmasında yer almasından dolayı, A sınıflandırması içine dahil olmayan daha kaygan koridorlarda, spirallerle dezenfekte edilen alanlarda, yüzme havuz çevresindeki alanlarda, çocuk havuzları, özellikle yağmur alan merdivenlerde, yüzme havuz dışındaki merdiven basamaklarında emniyetli olarak kullanılabilir. Kireçtaşları eskitilmiş yüzeylerde A sınıflandırmasında, travertenler ise P1 plaka boyutunda T2 numunesinde ve P1, P2 plaka boyutunda T3 numunesinde C sınıflandırmasında yer almıştır. C sınıflandırmasında yer alan travertenler havuzların kıyı eğimlerinde, B sınıflandırmasında yer almayan su içindeki merdivenler, yüzme havuzu dışındaki merdiven basamaklarında kullanılabilir. Eskitilmiş yüzeylerde mermerlerin yüzey pürüzlülüğü honlu yüzeylere göre artarak, 10-20 mm arasında olduğu için kayma potansiyeli orta seviyede yer almıştır. Kireçtaşlarında ise yüzey pürüzlülüğü 10 mm'dan küçük olduğu için kayma potansiyeli yüksek, travertenlerde ise 20-30 mm arasında ve 30 mm'dan büyük olduğu için kayma potansiyeli düşüktür.

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan çalışmada zemin kaplama malzemesi olarak kullanılacak doğaltaşların, DIN 51097 standardı kullanılarak 16 tür doğaltaşın üç farklı boyutta; cilalanmış, haniyanmış ve eskitilmiş yüzeylerdeki kayma açıları belirlenmiştir. Doğaltaşların yüzey işleme yöntemlerine bağlı olarak kayma açılarının değiştiği gözlemlenmiştir. Buna göre cilalı yüzeyden, honlu ve eskitilmiş yüzeyedoğru doğaltaşların yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir.

Doğaltaşların plaka boyutlarına ve yüzey işlemlerine göre belirlenen kayma açıları DIN 51097 Standardında belirtilen sınıflandırmaya uygun olarak ıslak zeminlerde kullanım alanları saptanmıştır. Buna göre; kayma açısı değeri A sınıfı içinde olan doğaltaşlar; genellikle kuru iken çıplak ayak kullanılan koridorlarda, sporcuların soyunma odalarında, sığ yüzme havuzlarında kullanılabilir. Kayma açısı değeri B sınıfında yer alan doğaltaşların; yüzme havuzu çevresindeki alanlarda, çocuk havuzlarında, yağmur alan veya ıslanan bölgelerdeki merdivenlerde, yüzme havuzu dışındaki merdivenlerde ve platformlarda insan emniyeti açısından kullanılabilmesi belirlenmiştir. Islak zemin kaplamalarında kayma açısı değeri C sınıfında yer alan doğaltaşlar ise eğimli havuz kenarlarında, su içinde kalan merdivenlerde kullanılabilir.

Pürüzlülük arttıkça, kayma açısı artmakta, bununla birlikte kayma emniyeti yükselmektedir. Zemin kaplamalarındaki derz boşlukları, çıplak ayakla zemin arasında pürüzlülüğü arttırdığı için, doğaltaşların ıslak zeminlerde kayma emniyetini yükseltmektedir. Çalışmada çıplak ayakla yürünecek ıslak zeminler için eskitilmiş yüzeylerde, küçük plaka boyutlarının daha güvenli olduğu belirlenmiştir. Doğaltaşlarda su emme, porozite ve permeabilite değeri arttıkça kayma açısı artmakta ve bunun yanında basınç dayanımı azaldıkça kayma açısı artmaktadır.

#### KAYNAKLAR

Adams, N., 1997; "Slips and Falls-Some Arguments About Measuring Coefficients of Friction (COF)", Productivity, ergonomics and safety : the total package : Proceedings of the International Workplace Health and Safety Forum and the 33rd Ergonomics Society of Australia Conference, 72-83.

Bowman, R., 1997; "Slip Resistance Standards Provide No Unconditional Guarantees", CSIRO Building, Construction and Engineering, (12), 364-367.

Bowman, R., 2003; Slip Resistance Ignorance: A Recipe for Costly Falls. (<http://www.infotile.com/tiletaday/issues/pdf/40article.pdf>).

Chang, W.R., 1998; "The Effects of Surface Roughness on Dynamic Friction Between Neolite and Quarry Tile", Safety Science, 29, 89-105.

- Chang, W.R., 1999; "The effect of surface roughness on the measurement of slip resistance", *International Journal of Industrial Ergonomics*, **24**, 299–313.
- Chang, W.R., Kim, I.J., Manning, D.P., Bunternghit, Y., 2001; "The role of surface roughness in the measurement of slipperiness", *Ergonomics*, **44**, 1200–1216.
- Chang, W.R., 2003; "The Role of Surface Waviness in Friction at Shoe and Floor Interface", *Proceedings of the Ergonomics Society Annual Conference, Edinburgh, UK*, 105-110.
- Chang, W.R., Hirvonen, M., Grönqvist, R., 2004; "The effects of cut-off length on surface roughness parameters and their correlation with transition friction", *Safety Science*, **42**, 755–769.
- Carpenter, J., Lazarus, D., Perkins, C., 2006; *Safer surfaces to walk on reducing the risk of slipping, Construction Industry Research and Information Association (CI RIA) C652*.
- DIN EN 51097, "Testing of floor Coverings; Determination of The Anti-Slip Properties; Wet-Loaded Barefoot Areas; Walking Method-Ramp Test", 1992, Deutsche Norm, Berlin.
- Engin, İ.C. ve Kulaksız, S., 2007; "Doğaltaş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri. Doğaltaş Parlatma-Cilalama Yöntemleri ve Kullanılan makineler", *Ankara*, **7**, 515-517.
- Engin, İ.C., 2007; "Doğal Taş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri. Dekoratif Taş İşletmeciliği, Ürün çeşitlendirme Yöntem ve Makineleri", *Ankara*, **8**, 594-595.
- Gürcan, S., 2006; *Doğal yapı malzemelerinde kaymazlık testi ve kayma direncinin belirlenmesi, Yüksek lisans tezi, A.K.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, Afyon*.
- Grönqvist, R., 1995; "Mechanisms of friction and assessment of slip resistance of new and used footwear sales on contaminated metals. *Ergonomics*, **38**, 224–241.
- Grönqvist, R., Hirvonen, M., Tohv, A., 1999; *Evaluation of three portable floor slipperiness testers. International Journal of Industrial Ergonomics*, **25**, 85–95.
- Kim, I.J., 1996; "Microscopic investigation to analyze the slip resistance of shoes", *Proceedings of the Fourth Pan Pacific Conference on Occupational Ergonomics, November. Taiwan, ROC*;68–73.
- Leclercq, S., 1999; "The prevention of slipping accidents: a review and discussion of work related to the methodology of measuring slip resistance", *Safety Science*, **31**, 95–125.
- Manning, DP., Jones, C., Rowland ,FJ., Roff, M., 1998; "The surface roughness of a rubber soling material determines the coefficient of friction on water-lubricated surfaces", *Journal of Safety Research*, **29**, 275–283.
- Manning, D.P., Jones, C., 2001; "The effect of roughness, floor polish, water, oil and ice on underfoot friction: current safety footwear solings are less slip resistant than microcellular polyurethane", *Applied Ergonomics*, **32**, 185–196.
- Miller, B.C., 1999; "Slip Resistance Standards: Sorting It All Out", *Safety & Health*, March 1999, 62-66.
- Rowland, F.J., Jones C., Manning DP., 1996; "Surface roughness of footwear soling materials: Relevance to slip resistance", *Journal of Testing and Evaluation JTEVA*, **24 (6)**,368–376.
- Sarıışık A., Çelik M.Y., Gürcan S., 2003; "Mermerlerin Mineralojik-Petrografik Özelliklerinin Jeomekanik Parametrelere Olan Etkileri", *20. Yıl Sempozyumu, Isparta*, 203.
- Sarıışık A., Gürcan S., Şentürk A., 2007; "Description of slipping test methods and application study on travertine by ramp slip meter", *Building and Environment*, **42**,1707–1710.
- Sarıışık, G., 2007; *Bazı Karbonat Kökenli Türk Doğaltaşlarının Teknik Özellikleri, Yapıda ve Restorasyonda Kullanım Alanları, Yüksek lisans tezi, A.K.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, Afyon*.
- Sarıışık, A., 2009; "Safety Analysis of Slipping Barefoot on Marble Covered Wet Areas", *Safety Science*, **47**, 1417-1428.
- Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y. I., Sarıışık, A., 1996; "Mermer Teknolojisi", *Isparta*.

## ÇATALAĞZI TERMİK SANTRAL KATI FOSİL YAKITI KIRILMA DAVRANIŞININ KARIŞTIRMALI DEĞİRMEN VE BİLYALI DEĞİRMENDE KARŞILAŞTIRILMASI

Comparison of the Breakage Behaviors' of Catalagzi Thermal Power Plant Solid Fossil Fuel in  
Stirred Mill and Ball Mill

Geliş (received) 12 Ekim (October) 2009; Kabul (accepted) 25 Kasım (November) 2009

Selçuk SAMANLI (\*)

### ÖZET

Dar tane boyut gruplarında hazırlanmış fosil yakıt, karıştırmalı değirmende 360 dev/dak ve Bond değirmeninde 70 dev/dak ile kuru olarak öğütülmüştür. Karıştırmalı değirmende "Bilya çapı/Değirmene beslenen maksimum tane boyutu" arasında yaklaşık 2,5 gibi oransal yaklaşım olduğunda, kırılma hızı maksimum gerçekleşmiştir. Değirmenlerde, bilyalar arası boşluğun %90'ı malzeme ile doldurulmuştur. Değirmene bağlı kırılma parametre değeri, "a<sub>T</sub>", karıştırmalı değirmende 1,08 ve bilyalı değirmende 0,53'dür. Bu, -212+150 µm ve -425+300 µm dar tane boyut gruplarında karıştırmalı değirmen lehine, yaklaşık 7 ve 5,5 kat hızlı gerçekleşen kırılma davranışının sonucudur. Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızı 425 µm tane boyutunda maksimum iken, bilyalı değirmende bu boyut 2360 µm'dir.

**Anahtar Sözcükler:** Öğütme, Katı fosil yakıt, Karıştırmalı değirmen, Bond değirmen, Kırılma davranışı, Özgül kırılma hızı.

### ABSTRACT

The solid fossil fuel prepared at mono size groups were ground as dry in stirred mill which was run 360 rpm stirring speed and Bond ball mill which was run 70 rpm. In stirred mill, breakage rate reached maximum when the he ratio of "Grinding medium size/Maximum size of the material ground" was approximately 2.5. The sample charged in the mills occupies as much as 90% of the gap volume between the balls in the mills. The parameters "a<sub>T</sub>", an important parameter depending on mill specifications, were found as 1.08 and 0.53 in stirred mill and ball mill respectively. This situation is the result of the specific rate of breakage at mono size groups, -212+150 µm and -425+300 µm, were carried out faster at stirred mill approximately 7 and 5.5 fold more than that at ball mill. Although specific rate of breakage reached its maximum at 425 µm in stirred mill, it was determined as 2360 µm in ball mill.

**Keywords:** Grinding, Solid fossil fuel, Stirred mill, Bond mill, Breakage behaviour, Specific rate of breakage

---

(\*) Yrd. Doç. Dr. Selçuk SAMANLI, Zonguldak Karaelmas Üni. Müh. Fak. Maden Müh. Böl. 67100  
İncivez/Zonguldak, selcuksamanli@karaelmas.edu.tr

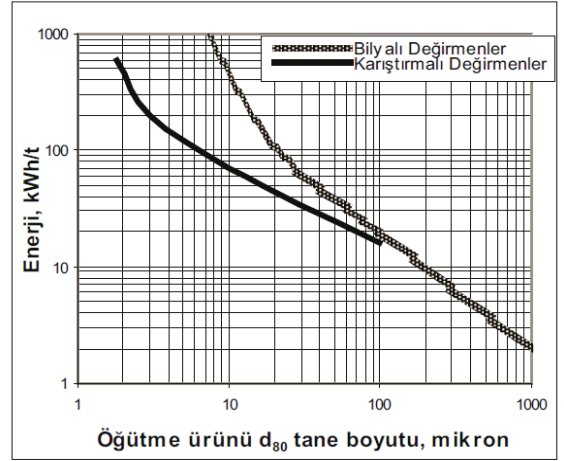
## 1. GİRİŞ

Dünya enerji üretiminde katı fosil yakıt tüketimi artan bir öneme sahiptir. Yüksek rezerve sahip enerji kaynağı olması, kömürle ilgili çalışmaların artmasına neden olmuştur. Kömüre dayalı termik santrallerde yüksek ısı kapasite ve yüksek yanma verimliliği elde etmek için, pülvarize enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, mikronize boyutta öğütülen katı fosil yakıt, santraldeki yakma kazanlarına gönderilmektedir.

Tane boyutu küçüldükçe tanelerin kırılmaya karşı olan dirençlerinin artmasıyla birlikte tüketilen enerji miktarları da aşırı bir şekilde artmaktadır. Bu bağlamda; öğütme, enerjinin en yaygın ve en verimsiz olarak kullanıldığı işlem birimidir. Öğütme konusunda yapılan çalışmaların çoğunda enerji-boyut küçültme arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılarak en az enerji ile en uygun boyuta küçültme yapabilmenin olanakları araştırılmaktadır (Bond, 1951; Mankosa vd, 1989; Gao ve Forssberg, 1993, Yang vd, 2006).

Konvansiyonel değirmenlerde, öğütme verimi 75  $\mu\text{m}$  altındaki boyutlarda oldukça azalmakta ve öğütmede harcanan enerjinin önemli bir bölümü faydalı bir iş yapmadan (boyut küçültme) ısı ve ses olarak kaybedilmektedir. Kömür, konvansiyonel değirmenlerde (bilyalı, çubuklu ve diğer) öğütebildiği gibi, son zamanlarda çok ince boyutlarda dahi etkili öğütme yapabilen karıştırmalı değirmenlerde de öğütülebilmektedir. Bilyalı değirmenlerde 10  $\mu\text{m}$  altında öğütme yapmak neredeyse imkânsız iken, karıştırmalı değirmenlerde bu olasıdır. Bunun nedeni, karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle enerji tüketimlerinin tamburlu değirmenlere kıyasla oldukça düşük kalmasıdır (Kwade, 1999; Wang ve Forssberg, 2000; Jankovic, 2003; Dikmen ve Ergün, 2004; Bilgili vd, 2006; Ding vd, 2007).

Artan enerji tüketimiyle birlikte bilyalı değirmenlerde elde edilen tane boyutu  $>10 \mu\text{m}$  iken, karıştırmalı değirmenlerde  $<10 \mu\text{m}$  ürün boyutuna ulaşılabilmektedir. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi değişimi Jankovic (2003) tarafından aşağıda sunulan Şekil 1' de grafiksel olarak oldukça açık ifade edilmiştir.



Şekil 1. Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi değişimi (Celep ve Alp'den (2008) alıntı yapılmıştır).

Bununla birlikte, kullanılan karıştırmalı değirmenlerin büyük ölçekte yapılması, ortam aşınmasının fazla olması ve işlem sırasında bilyaların çıkış ızgarasını tıkaması gibi problemlerin çözümü veya öğütme yardımcılarının etkisi de gelecekte yapılacak araştırma konularının temelinde yer alacaktır (Celep ve Alp, 2008).

Karıştırmalı değirmenlerde aşındırma ve kesme kuvvetleri etkilidir. Özellikle ince tanelerin öğütülmesinde kesme kuvvetinin diğer kuvvetlere göre daha etkili olduğu bilinmektedir. Küçük tanelerin ufalanmasında basınç ve burulma kuvvetleri gereklidir. Çarpma ve aşınma kuvvetlerinin baskın olduğu bilyalı değirmenlerde öğütme iri boyutta kalmaktadır. Bilyalı değirmenlerin ekonomik öğütme sınırları 100  $\mu\text{m}$ 'ye kadardır. Bu sınırların altına inildiğinde bilyalı değirmenlerin özgül enerjilerinin üstel olarak artış gösterdiği belirtilmiştir (Liddell, 1986; Jankovic, 2003; Fuerstenau vd, 2004; Makokha vd, 2006).

Karıştırmalı değirmenler, mikronize malzeme üretiminde çok etkili öğütücülerdir. Diğer ince öğütme yapan cihazlara göre kolay işletim, basit konstrüksiyon, yüksek boyut küçültme oranı, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi ve düşük enerji sarfıyatı yönünden son yıllarda oldukça büyük önem kazanmıştır ve dar tane boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında tercih edilmektedir (Miranda ve Yaeger, 1998; Wang ve Forssberg, 2000; Sinnott vd, 2006). Birçok üstünlüklerinden ötürü mineral,

seramik, metalürji, elektronik, boya, kimya, gıda, hayvan besini, biyoteknoloji, lastik, ziraat, ilaç, fotoğraf, kömür ve enerji endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mankosa vd, 1986; Fadhel ve Frances, 2001; Kwade ve Schwedes 2002).

Karıştırmalı değirmen, sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir eksenini üzerinde dönen bir rotordan oluşmaktadır. Rotor üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiş çubuk veya diskler yardımıyla silindiri dolduran ortam hareket ettirilerek öğütme yapılmaktadır. Öğütme ortamı, genelde seramik, çelik, bazen de cam, alüminyum gibi uygulama alanına bağlı değişik malzemelerden imal edilen bilyalardır (Bilgili vd, 2006; Ding vd, 2007). Bilyalar değirmen hacminin %70–80'ini doldurmaktadır (Tuzun vd, 1995; Blecher ve Schwedes, 1996; Karbstein vd, 1996). Öğütücü ortam olarak birkaç yüz mikrondan birkaç milimetreye kadar değişebilen bilyalar kullanılmaktadır. Ortam boyutları uygulamaya göre 0,2 ile 8 mm arasında değişebilir. Beslenen cevherin verimli öğütülebilmesi için 100 µm'den ince olması gerekir. Ürün boyutu, bilya boyutu azaldıkça ve/veya karıştırma hızı arttıkça orantılı olarak ekonomik ve verimli bir şekilde mikronize boyuta inmektedir. Karıştırıcı disk sayısının ve değirmen hacminin artışı, öğütmeye verilen gücün artışı ve bilya sarfiyatının azalmasıyla sonuçlanmaktadır (Young ve Gao, 2000).

Karıştırmalı değirmendeki bilyaların, bilyalı değirmenlerdeki ortamın hareketi ve kendi ağırlığı ile kazandığı kinetik güce erişebilmesi için hızının yeterli ölçüde artırılması gerekmektedir. Karıştırma ünitesi diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç tipden oluşur. Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi, yaş veya kuru olarak farklı cevherlerin öğütülmesinde kullanılmaktadır (Tuzun vd, 1995; Kwade, 1999; Jankovic ve Sinclair, 2006; Sinnott vd, 2006; Ding vd, 2007).

Karmaşıklaşan cevher yapısının ince boyutta serbestleşme gerektirmesinden ötürü çok ince öğütme kaçınılmaz hale gelmiştir. Klasik bilyalı değirmenler ile bu boyutta serbestleşme mümkün olamayacağı için yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmenlerin imalatı zorunlu hale gelmiştir. Bazı eski tesislerdeki öğütme sistemlerinin yenileştirilmesinde, önceki bilyalı değirmenlere ek olarak tekrar öğütme devrelerinde karıştırmalı değirmenlere de yer verilmektedir (Tuzun vd, 1995).

Endüstriyel kullanımı yaygınlaşmaya başlayan karıştırmalı değirmenlerden 6 µm ( $d_{50}$ ) ürün boyutunda 20 t/s kapasiteye varanları mevcuttur (Mankosa vd, 1986). Bu değirmende yapılan öğütmede özgül enerji sarfiyatı da bilyalı değirmenlere oranla %60 daha az olabilmektedir. Tane boyutu 15 µm altına yapılacak öğütmelerde diğer yöntemlere oranla daha ekonomik işlemleri mümkün kılmaktadır (Orumwense ve Forssberg, 1992). Günümüzde, yatay karıştırmalı değirmen "İsa mill", %70-80 öğütücü bilya doluluk oranı ile, %40-50 pülp katı oranında, 180-240 lt/dk pülp çalışma debisinde, 1120 kW güçle yüksek kapasiteyle çalıştırılmaktadır (Yaung ve Gao, 2000).

Diğer taraftan; günümüzde kullanılmakta olan bilyalı (kamaralı tip) değirmenlerde boy/çap oranı genellikle 2,5'ten büyüktür. Tüp değirmen olarak da adlandırılan ve birinci kamarada iri, ikinci kamarada daha ince bilyaların kullanıldığı bu tip değirmenler, kuru öğütme yaparlar. Acık devre, kapalı devre ve yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerle birlikte kullanıldığı devrelerde uygulama alanı bulmaktadırlar (Erdem vd, 2007). Birim ağırlık için bilya yüzey alanı çubuklardan daha fazla olduğu için bilyalı değirmen ince öğütme için daha uygundur. Bunların uzunluk/çap oranı 1–1,5 ile sınırlıdır. Bilyalı değirmenler, öğütme tamburu ve öğütme gövdelerinin (bilyalar veya miller) dönüşü yoluyla malzemeyi öğütür. Bilyalı değirmenlerde, bilyalara ufalama etkisini sağlayacak kinetik enerji kazandırmak daha kolaydır. Çünkü ortam boyutu oldukça iridir. Bilyalı değirmenlerde kullanılan bilya ebadı 50-20 mm arasındadır. Şarj miktarı değirmen iç hacminin %40–50'si kadardır. Değirmene verilmesi gereken enerji, şarj miktarı ile artar. Değirmen hacminin %50'si kadar şarj verilirse harcanması gereken enerji maksimum olur. Optimum değirmen hızı da şarj hacmi ile artar.

## 2. KIRILMA DAVRANIŞININ TANIMLANMASI

Kinetik modelde ufalama birim işlemi bir hız süreci olarak ele alınmıştır. Bu modeli ilk olarak ileri süren Roberts (1950)'dir. Roberts birim kütle başına değirmenin çektiği güç ile elek üstündeki malzemenin değişim hızı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve yaş öğütme teorisi olasılığını önermiştir. Daha sonra Bowdish (1960) Roberts'ın çalışmasını geliştirmiş ve bir bilyalı değirmendeki iri malzemenin kırılma hızının,



değirmende bulunan iri malzeme konsantrasyonu ile orantılı olduğunu göstermiştir. Yani, bir bilyalı değirmendeki belirli bir boyuttaki parçaların öğütülmesi “birinci derece hız süreci” olarak kabul edilir (Lynch vd, 1986; Fuerstenau vd, 2004).

## 2.1. Kırılma Davranışının Kinetik Modelde Tanımı

Doğrusal birleştirilmiş parametre modelinde değirmen, iri tane boyutunda malzemenin kırılarak, ince tane boyutunda ürünün oluştuğu bir reaktör olarak düşünülmektedir. Bu durumda değirmene belli bir boyutta veya bir boyut aralığında beslenen malzemeyi de reaktant olarak tanımlamak mümkündür. Beslemenin boyut dağılımı grafiksel olarak ifade edilebilir. Bu yöntemde, birikimli % ağırlık miktarının elek boyutuna karşı logaritmik ölçekli gösterimiyle birinci derece kırılma hızı elde edilir. Gaudin Schuhmann eğrisi olarak isimlendirilen grafiksel tanımlama yönteminde özellikle boyutlar daha iyi tanımlanır. Belirli tane boyu dağılımına sahip besleme malzemesinde her tane boyu aralığındaki malzemenin kırılma hızları birbirinden farklı olmaktadır (Klimpel ve Austin, 1970; Austin vd, 1984; Fuerstenau vd, 2004).

Değirmende etkin bir şekilde kırılma olduğu zaman belirli bir tane boyu aralığında olan malzemenin kırılması genellikle birinci derece öğütme kuramına uymaktadır. Birinci derece ifadesi, reaksiyonun yavaşlamadan devam etmesi anlamını taşır. Reaksiyonun yavaşlaması durumunda, ikinci ve üçüncü derece reaksiyon hızları oluşur. Öğütme işleminde birinci derece öğütme hipotezini daha iyi anlayabilmek için, için W miktarda numune konulmuş basit bir değirmen dikkate alınır. Buradaki malzemenin boyut dağılımı  $\sqrt{2}$  veya  $\sqrt[4]{2}$  geometrik elek serilerinden 1, 2, 3...j, ...i, ... boyut aralıklarında tanımlandığı düşünülmektedir. Bu besleme malzemesi bir seri artan zaman aralıklarında öğütüldüğünde, bunların öğütülme hızları genellikle birinci derece öğütme kinetiğine uyacaktır. Buna göre; i, tane boyu aralığının “kırılma hızı =  $S_1 w_1 W$ ” olacaktır.

Burada  $S_1$ , i tane boyu aralığındaki malzemenin birim kütlelerinin birim zamanda kırılma hızı;  $w_1$ , i tane boyu aralığındaki malzeme fraksiyonu ve W ise değirmende öğütülen malzemenin toplam ağırlığıdır. Eğer başlangıç beslemesinin

tamamı 1. boyut aralığı ile tanımlanan üst boyut aralığında yani en iri boyut fraksiyonunda ise; kırılmayla 1. boyut aralığının kaybolma hızı  $w_1(t)$  W ile orantılı olacaktır. Toplam kütle, W, sabit olduğundan aşağıdaki Eşitlik 1 elde edilir;

$$\frac{dw_1(t)}{dt} = -S_1 w_1(t) \dots\dots\dots(1)$$

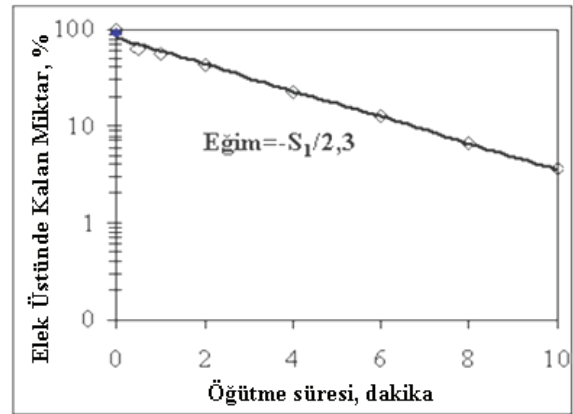
Burada,  $S_1$  özgül kırılma hızı olarak adlandırılır ve bu değer oransal olarak sabit ise ve zamanla değişmiyorsa, aşağıdaki Eşitlik 2 ile ifade edilir.

$$w_1(t) = w_1(0) \exp(-S_1 t) \dots\dots\dots(2)$$

Sonuçta; Eşitlik 3 ile verilen ve birinci derece öğütme kinetiği olarak ifade edilen formül elde edilir.

$$\log[w_1(t)] = \log[w_1(0)] - S_1 t / 2,3 \dots\dots\dots(3)$$

Burada,  $w_1(0)$  ve  $w_1(t)$  öğütmenin başlangıcındaki ve “t” anındaki 1. boyut aralığında bulunan malzemenin yüzdesini,  $S_1$  1. boyut aralığındaki malzemenin kırılma hızını ve t ise zamanı göstermektedir. Birinci derece kırılma davranışı Şekil 2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. Birinci derece kırılma davranışı.

## 2.2. Kırılma Hızının Tane Boyu ile Değişimi

Tek bir çaptan oluşan bilyaların öğütücü ortam olarak kullanılmasıyla, özgül kırılma hızı ile tane boyu arasındaki ilişki, aşağıda Eşitlik 4 ile ifade edilebilir;

$$S_i = a_T \left[ \frac{x_i}{x_n} \right]^\alpha, x_i \ll d \dots\dots\dots(4)$$

Burada;  $a_T$  değirmen koşullarına bağlı bir parametre iken  $\alpha$  malzemeye göre değişiklik gösteren karakteristik bir parametredir. Ayrıca;  $x_i$  ve  $d$  sırasıyla tane boyu ve bilya çaplarıdır,  $x_0$  ise 1000 mikrondur. Çatlak teorisine göre tanelerin boyutları küçüldükçe dayanımları artmaktadır. Çünkü büyük boyutlarda görülen çatlaklar tane boyu küçüldükçe ortadan kalkmaktadır. Aynı zamanda, geometrik etki nedeniyle, iri tanelere oranla küçük tanelerin bilyalar tarafından kavranmaları zor olmaktadır. Böylece tane boyu küçüldükçe kırılma olayı zorlaşmaktadır. İri tane boyunda malzeme başlangıçta hızlı, daha sonra yavaşlayan bir hız ile kırılarak birinci derece öğütme kinetiğinden sapmaktadır. Öğütmenin başlangıcında özgül kırılma hızı, tane boyu ile artarken belirli bir tane boyundan sonra yavaşlamaya başlar. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi, oluşan ince taneler yastıklama etkisi yaparak iri boyların kırılmasını engeller. Genellikle ince kuru öğütmede ve viskozitesi yüksek yaş öğütmede görülmektedir, bu olaya ortam etkisi denilmektedir. İkincisi ise, öğütülecek malzeme tane boyunun bilya çapından çok büyük olması durumunda normal olmayan kırılma bölgesinde oluşan sapsmalardır. Bu durumda iri taneler bilyalar tarafından kavranamamaktadır. Malzemenin bir miktarı nispeten daha zayıf, bir miktarı da daha dayanıklı malzeme gibi davranmaktadır (Austin, 1971; Austin ve Bhatia, 1971; Austin vd, 1982; Zhenhua vd, 1998; Fuerstenau vd, 2004).

Birinci derece öğütme kinetiğine uyan ince malzemelerin kırılması "normal kırılma bölgesi" olarak adlandırılırken, birinci derece öğütme kinetiğine uymayan kırılma ise "normal olmayan kırılma bölgesi" olarak adlandırılmaktadır. Tane boyunun büyümesiyle bilyaların sahip olduğu enerjinin, tanelerin verimli bir şekilde kırılmasına yetmemesi ile özgül kırılma hızının düşmeye başlaması öğütmede doğrudan verimsizlik olarak adlandırılır. Bilyaların aktarma enerjisi ile etkin bir şekilde kırılmayan taneler, öğütme için büyük kabul edilirler. Bununla birlikte büyük taneler arzu edilen ürün kalitesinde ve miktarında azalmaya sebep olarak çentme ve aşındırma ile ince ürün oluşturabilirler.

Özgül kırılma hızının belirli bir tane boyu değerinden sonra düşmeye başladığını ifade etmek için, özgül kırılma hızı ile tane boyu arasındaki ilişkiyi " $Q_i$ " düzeltme faktörü ile

çarpmak gerekmektedir. Sonuçta kırılma hızı ( $S_i$ ) aşağıdaki Eşitlik 5 ile ifade edilir,

$$S_i = a_T x_i^\alpha Q_i \dots \dots \dots (5)$$

$Q_i$ , ince taneler için 1 değerini alırken, tane boyutu büyüdükçe bu değer küçülmektedir.

$Q_i$ ' nin aşağıdaki Eşitlik 6'ya uyduğu bulunmuştur,

$$Q_i = \frac{1}{1 + (x_i / \mu)^\Lambda} \cdot \Lambda \geq 0 \dots \dots \dots (6)$$

Burada  $\mu$ , düzeltme faktörünün 0,5 olduğu tane boyu olup öğütme şartlarıyla değişmektedir.  $\Lambda$ , ise tane boyunun büyümesiyle kırılma hızının azalmasını gösteren pozitif değere sahip bir parametredir.  $\Lambda$  değerinin büyümesi ile kırılma hızı değeri düşmektedir.  $\Lambda$  malzeme özellikleri,  $\mu$  ise değirmen işletme koşullarıyla değişen parametrelerdir (Austin vd, 1976; Austin vd, 1984).

Özgül kırılma hızının maksimum olduğu tane boyu malzeme özellikleri ile değişir. Malzeme sertliği azaldıkça, özgül kırılma hızının maksimum olduğu tane boyu değeri büyür (Austin vd, 1976; Austin vd, 1984; Prasher, 1987; Sönmez, 1992; Yerlikaya, 1994; Teke vd, 2002; İpek vd, 2005).

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Çatalağzı termik santralında (ÇATES) yakıt TTK'nın Kozlu, Üzülmez ve Çatalağzı lavvarlarından ve özel sahalardan temin edilmektedir. ÇATES yakıtı, kül oranı yüksek yıkama artıkları ile düşük küllü temiz kömürlerin ÇATES şartname değerlerine uygun yakıt elde edecek şekilde (kül ve kalori bazında; %46±2 kül ve 3200±100 Kkal/kg alt ısıl değer) harmanlanması ile elde edilir. ÇATES stok harmanından değirmenlere besleme yapan bantlardan numune alma standartlarına uygun olarak numune alınmış, harmanlanarak santral içinde havada kurutulmuştur. ÇATES numunesinin kuru bazda aşağıda Çizelge 1'de verilen özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 1. Fosil Yakıt Kısa Analiz Sonuçları.

Numune	Kül (%)	Uçucu Madde (%)	Kükürt (%)	Ü. Isıl Değer (Kkal/kg)
Fosil yakıt	47,58	17,20	0,50	3825

Ayrıca; piknometre ile yapılan yoğunluk belirleme testleri sonucunda, ÇATES numunesinin 1,8 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir.

### 3.1. Öğütme Deneyleri

Bu çalışmada, konik kırıcıda kontrollü olarak 3,35 mm altına kırılmış olan katı fosil yakıtından hazırlanan dartane boyut aralıklarında, laboratuvar ölçekli dikey pinli karıştırmalı değirmen ve Bond bilyalı değirmende kuru olarak öğütme deneyleri yapılmıştır.

Öğütme deneylerinde kullanılmak üzere ÇATES numunesi, Russell elek kullanılarak -3350+2360 µm, -2360+1700 µm, -1180+850 µm, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında hazırlanmıştır.

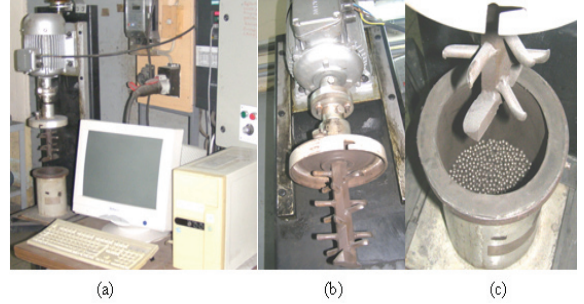
Deneyel çalışmalarda; değişen parametreler altında, söz konusu dar tane boyut gruplarındaki katı fosil yakıtın kırılma davranışı incelenmiş, karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende öğütme kinetiği açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca; ÇATES numunesinin öğütülebilirliği iki kategoride yapılan deneyler sonucunda değerlendirilmiştir. Birincisi, Bond bilyalı değirmeninde yapılan deneyler sonucunda belirlenen "Bond iş indeksi"dir. İkincisi ise, Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda belirlenen "Hardgrove indeksi"dir.

#### 3.1.1. Laboratuvar Ölçekli Karıştırmalı Değirmen ile Yapılan Kesikli Öğütme Deneyleri

Karıştırmalı değirmen; gövde, AC motor, inverter, güç sayacı ve bilgisayar donanımı olmak üzere beş ana ekipmandan oluşmaktadır. Değirmen 2,2 kW'lık güce sahip maksimum devri 1500 dev/dak olan bir motorla karıştırılmaktadır. Farklı karıştırma hızlarında deney yapabilmek için Siemens Midi Master 1500 model sürücü (frekans inverteri) motora bağlanmıştır. Karıştırma hızını ve deney süresini hassas ayarlayabilmek için PC bağlantısı yapılmıştır.

Ayrıca sisteme bağlı elektrik sayacından çekilen enerji de ölçülebilmektedir.

Aşağıda Şekil 3'de laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen bütün ekipmanları: (a), karıştırıcı mil ve pinler (b), gövde ve öğütücü bilyalar (c) görülmektedir.

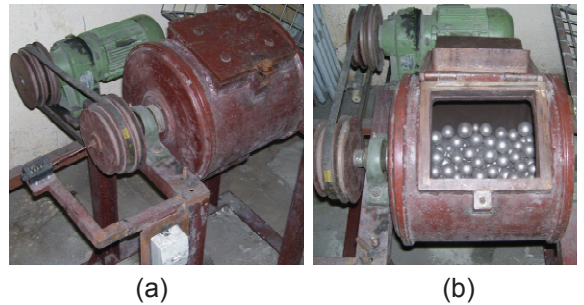


Şekil 3. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmen.

Karıştırmalı değirmen gövde hacmi 2945 cm<sup>3</sup> olarak ölçülmüştür. Değirmen karıştırıcı mili ve silindirik karıştırıcı pinlerin hacmi çıkarıldığında kalan etkin değirmen hacminin yaklaşık % 40'ı öğütücü ortam ile doldurulmuştur. Kullanılan numune ağırlığı ise, bilyalar arası boşluğun %90'ını dolduracak oranda belirlenmiştir.

#### 3.1.2. Laboratuvar Ölçekli Bilyalı Değirmen ile Yapılan Kesikli Öğütme Deneyleri

Öğütülebilirlik deneyleri aşağıda Şekil 4'de görülen Bond bilyalı değirmende yapılmıştır. Bilyalı değirmende öğütme deneylerinde kullanılan malzeme ağırlığı, Austin vd.'ne göre (1984) hesaplanmış olup, yaklaşık 1650 gr olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Bu çalışmada kullanılan laboratuvar ölçekli Bond bilyalı değirmen; (a) Gövde-motor-kayış kasnak, (b) Öğütücü bilyalar.

Bilyalı değirmene ait karakteristik özellikler ve öğütücü ortam özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Bond Bilyalı Değirmen ve Öğütücü Ortam Karakteristik Özellikleri.

Değirmen	Çap x Uzunluk, (cm)	30,5 x 30,5
	Hacim, (cm <sup>3</sup> )	22272,5
	Dönüş hızı, (dev/dak)	70
		36,83 – 43 29,72 – 67 25,40 – 10
Öğütücü Ortam	Bilya çapı, (mm) - Adedi	19,05 – 71 12,70 – 94
	Yoğunluğu, (gr/cm <sup>3</sup> )	7,79
	Toplam ağırlığı, (gr)	20125
	Bilya doldurma oranı	0,1933

#### 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

##### 4.1. Karıştırmalı Değirmende Kırılma Davranışının Belirlenmesi

-3350+2360 µm, -2360+1700 µm, -1180+850 µm, -425+300 µm ve -212+150 µm dar tane boyut gruplarında hazırlanan ÇATES numunesi, laboratuvar ölçekli karıştırmalı değirmende değişen sürelerde öğütülerek, kırılma davranışları incelenmiştir. Karıştırmalı değirmen öğütme deneylerine, karıştırma hızı (dev/dak) ve en uygun bilya boyutu’nun (mm) belirlenmesine yönelik yapılan deneyler ile başlanmıştır.

Deneylerde kırılma davranışı incelenirken, her bir öğütme periyodu sonunda en üst tane boyutu eleğinin üstünde kalan miktar sırasıyla %80, %50, %10 ve %5 oranlarında olacak şekilde seçilmeye çalışılmıştır. Söz konusu bu oranlar, daha önce de değişik araştırmacılar (Klimpel ve Austin, 1970; Austin vd, 1984; Ozkan ve Yekeler 2003; Fuerstenau vd, 2004; Deniz, 2004; Yue ve Klein, 2005; İpek vd, 2005; Bilgili vd, 2006) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, kırılma davranışı hızını belirlemede kullanılmıştır.

##### 4.1.1. Karıştırma Hızının Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Karıştırma hızının değişimi, motor gücü değiştirilerek sağlanmıştır. 1440 dev/dak, 720 dev/dak ve 360 dev/dak olmak üzere 3 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. Karıştırmalı değirmende, %100 motor gücüne karşılık gelen

karıştırma dönüş hızı 1440 dev/dak olarak gerçekleştirilmektedir. Karıştırmalı değirmen karıştırma hızının belirlenmesi için 5 sn, 10 sn ve 15 sn olmak üzere 3 farklı öğütme süresinde çalışılmış, her öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin boyut dağılımları belirlenmiştir. Karıştırmalı değirmende aşağıda belirtilen deney koşullarında öğütme çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Samanlı, 2008):

Kullanılan malzeme boyutu: -2360+1700 µm  
1700 µm elek üstü miktarı: % 91,51  
Malzeme miktarı: 472 gr  
Karıştırma hızı : 1440, 720, 360 dev/dak  
Öğütücü ortam çapı: 6 mm  
Öğütücü ortam miktarı: 5594 gr  
Öğütme süreleri: 5, 10, 15 sn

Öğütme sonuçları aşağıda Çizelge 3-5’de sunulmuştur;

Çizelge 3. 1440 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	84,19	91,52	93,24
-1180+850	66,33	77,84	82,63
-850+600	55,78	70,80	77,48
-600+425	49,02	66,21	74,43
-425	42,31	61,78	71,44

Çizelge 4. 720 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	57,17	67,10	76,62
-1180+850	33,95	43,33	53,41
-850+600	24,51	32,88	42,16
-600+425	19,18	26,78	35,51
-425	14,74	21,76	29,43

Çizelge 5. 360 dev/dak Karıştırma Hızında Yapılan Deneylerin Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	10 sn	15 sn
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	28,35	37,99	45,44
-1180+850	12,18	18,79	23,86
-850+600	8,37	13,26	17,08
-600+425	6,55	10,55	13,56
-425	5,19	8,31	10,44

15 sn öğütme sonunda; 1440 dev/dak, 720 dev/dak ve 360 dev/dak karıştırma hızlarında sırasıyla; 18,42 kW/t, 6,84 kW/t ve 2,63 kW/t enerji çekildiği hesaplanmıştır. Kırılma davranışı belirlemede istenen elek üstü oranları, karıştırma hızı 360 dev/dak'da elde edilmiştir.

#### 4.1.2. Öğütücü Ortam Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

Karıştırma hızı 360 dev/dak sabit olmak üzere, 1700 µm elek üstü miktarı % 91,51 olan -2360+1700 µm dar tane boyut grubunda, yapılan öğütmelerde, öğütücü ortam olarak 6 mm, 4 mm ve 2,36 mm çaplı bilyalar kullanılmıştır. Ayrıca her üç boyuttan ağırlıkça 1/3 oranında karıştırarak hazırlanan bilya karışımı ile öğütme deneyleri yapılarak, öğütücü ortam boyutunun kırılma davranışına etkileri araştırılmıştır (Samanlı, 2008).

6 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 6 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 472 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5594 gr  
Öğütme süreleri: 5, 15 sn, 1, 5, 12 dak.

Çizelge 6. 6 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	1 dak	5 dak	12 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	28,35	45,44	65,47	80,25	88,98
-1180+850	12,18	23,86	43,41	64,92	77,99
-850+600	8,37	17,08	34,68	59,98	74,77
-600+425	6,55	13,56	30,02	58,03	73,90
-425	5,19	10,44	26,00	56,99	73,50

4 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 7 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 480 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5693 gr  
Öğütme süreleri: 5, 15 sn, 5, 8 dak.

Çizelge 7. 4 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	5 sn	15 sn	5 dak	8 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	25,42	37,92	74,06	79,34
-1180+850	8,60	16,62	50,48	55,91
-850+600	6,46	12,47	42,52	48,08
-600+425	5,25	10,19	38,10	44,23
-425	4,25	8,39	35,33	42,09

2.36 mm boyutlu bilya ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 8 ile sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 485 gr  
Öğütücü ortam miktarı: 5752 gr  
Öğütme süreleri: 15 sn, 1, 8 dak.

Çizelge 8. 2,36 mm Bilya ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	15 sn	1 dak	8 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	22,31	33,22	55,11
-1180+850	6,68	13,03	32,39
-850+600	5,22	9,67	24,91
-600+425	4,47	7,94	19,98
-425	3,81	6,23	15,63

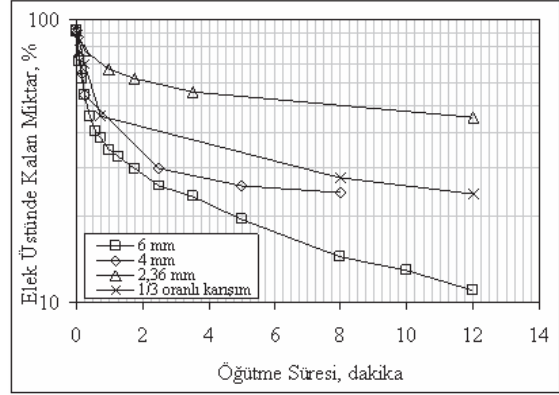
2.36-4-6 mm boyutlu bilyaların ağırlıkça 1/3 oranında karışımları ile aşağıda verilen deneysel koşullarda öğütme deneyleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 9'da sunulmuştur:

Malzeme miktarı: 479 gr  
 Öğütücü ortam miktarı: 5680 gr  
 Öğütme süreleri: 15 sn, 8, 12 dak.

Çizelge 9. 2,36-4-6 mm Bilya Karışımı ile Öğütme Deney Sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	15 sn	8 dak	12 dak
	E. A. (%)	E. A. (%)	E. A. (%)
-2360+1700	100,00	100,00	100,00
-1700+1180	30,46	72,44	75,67
-1180+850	12,27	50,75	55,73
-850+600	8,67	39,69	45,79
-600+425	6,75	32,31	39,10
-425	5,27	26,06	35,27

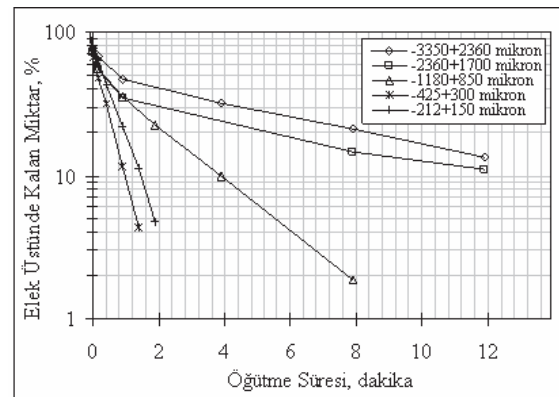
ÇATES numunesinin kırılma davranışlarının incelenmesi sonucunda; 6 mm boyutlu bilya ile yapılan karıştırmalı değirmen deneylerinde öğütmenin 4 mm, 2,36 mm ve bunların 1/3 ağırlıksal oranlı bilya karışımlarından daha hızlı gerçekleştiği sonucuna varılmış ve sonuçlar aşağıda Şekil 5'de sunulmuştur (Samanlı, 2008).



Şekil 5. Farklı boyutlu bilyalar ile yapılan öğütme deneylerinde kırılma davranışları.

#### 4.1.3. Tane Boyutunun Kırılma Davranışına Etkisinin İncelenmesi

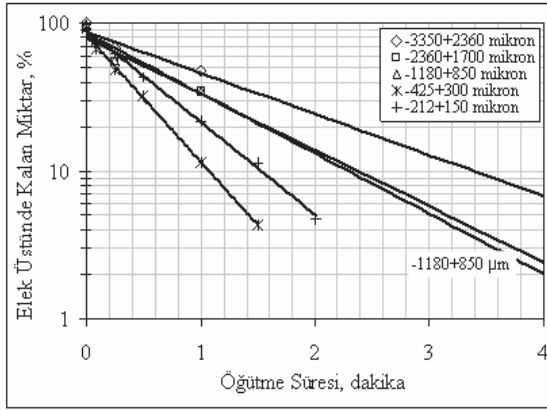
Dar tane boyut gruplarında (-212+150  $\mu\text{m}$ , -425+300  $\mu\text{m}$ , -1180+850  $\mu\text{m}$ , -2360+1700  $\mu\text{m}$  ve -3350+2360  $\mu\text{m}$ ) hazırlanmış malzemeler karıştırmalı değirmende, 360 dev/dak karıştırma hızı ve 6 mm bilya boyutu ile değişen sürelerde öğütülmüştür. Öğütme süresi sonunda üst tane boyu aralığında kalan malzeme fraksiyonlarının öğütme sürelerine karşı yarı logaritmik grafikleri çizilmiştir. Grafiğin doğrusal olarak azaldığı bölge birinci derece kırılma bölgesini temsil etmektedir ve bu doğrunun eğiminden de malzemenin o tane boyu aralığındaki özgül kırılma hızı ( $S_1$ ) belirlenmiştir. Sonuçta; söz konusu boyut gruplarında, tane boyutunun kırılma davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Karıştırmalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

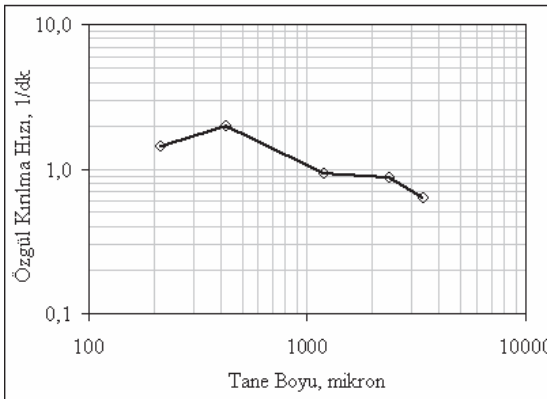
Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı  $-425+300 \mu\text{m}$  ve  $-212+150 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir.  $-1180+850 \mu\text{m}$  dar tane boyut grubunda kısmen doğrusal hareket söz konusu iken,  $-3350+2360 \mu\text{m}$  ile  $-2360+1700 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında doğrusal kırılma davranışından uzaklaşmıştır.

Şekil 6'da görülen bütün dar tane boyut grupları için kırılma davranışının doğrusallıktan uzaklaştığı kısımlar göz ardı edilir ve her bir dar tane boyut grubu için birinci derece kırılma davranışının var olduğu süreler dikkate alınır; elde edilen birinci derece kırılma davranışları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Karıştırmalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmış ve aşağıda Şekil 8'de verilmiştir.

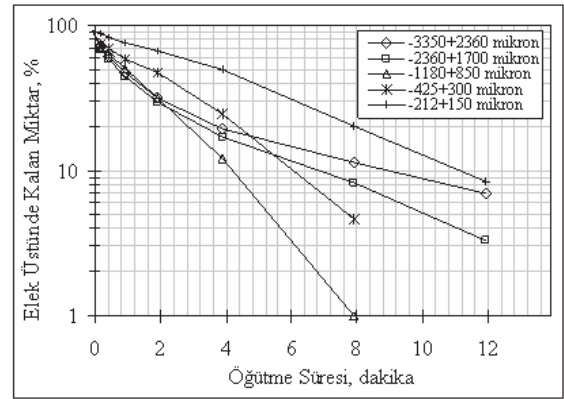


Şekil 8. Karıştırmalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

Özgül kırılma hızı  $425 \mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşmıştır. Grafikten  $a_T=1,08$  ve  $\alpha=0,51$  olarak hesaplanmıştır (Samanlı, 2008).

#### 4.2. Bond Bilyalı Değirmende Kırılma Davranışının Belirlenmesi

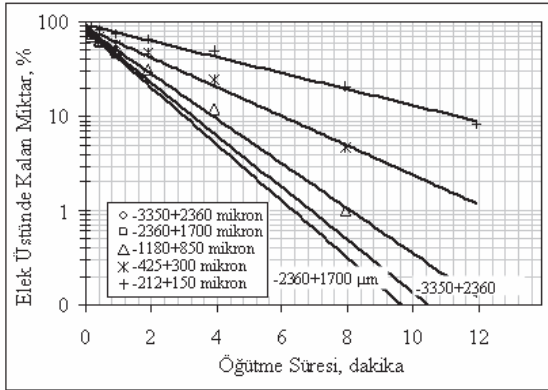
Dar tane boyut gruplarında ( $-212+150 \mu\text{m}$ ,  $-425+300 \mu\text{m}$ ,  $-1180+850 \mu\text{m}$ ,  $-2360+1700 \mu\text{m}$  ve  $-3350+2360 \mu\text{m}$ ) hazırlanmış olan malzemeler değişen sürelerde öğütülmüştür. Kırılma davranışları aşağıda Şekil 9'da tüm dar tane boyut grupları için birlikte sunulmuştur.



Şekil 9. Bilyalı değirmende dar tane boyut gruplarında kırılma davranışı.

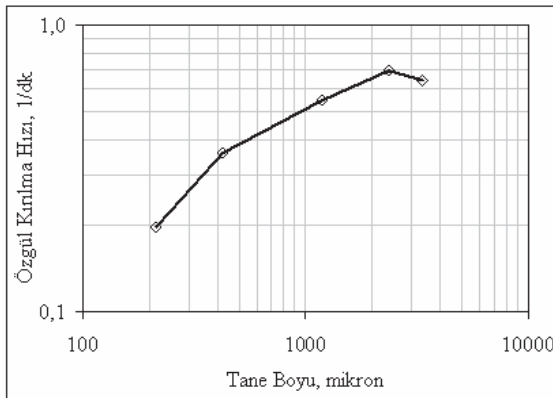
Bilyalı değirmende öğütmede birinci derece kırılma davranışı  $-1180+850 \mu\text{m}$ ,  $-425+300 \mu\text{m}$  ve  $-212+150 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında gerçekleşmiştir.  $-3350+2360 \mu\text{m}$  ve  $-2360+1700 \mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında doğrusal kırılma davranışından kısmen uzaklaşmıştır.

Şekil 9'da görülen bütün dar tane boyut grupları için kırılma davranışının doğrusallıktan uzaklaştığı kısımlar göz ardı edilmiş ve her bir dar tane boyut grubu için birinci derece kırılma davranışının var olduğu süreler dikkate alınmıştır. Elde edilen birinci derece doğrusal formdaki kırılma davranışları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Bilyalı değirmende birinci derece kırılma davranışı.

Doğruların eğimlerinden özgül kırılma hızları hesaplanmıştır. Hesaplanan özgül kırılma hızlarının, elek aralıklarının üst değerlerine göre logaritmik olarak grafikleri çizilerek Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. Bilyalı değirmende kırılma hızlarının tane boyutu ile değişimi.

Özgül kırılma hızı 2360  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşmış, sonrasında azalmaya başlamıştır. Doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle ölçülen ile hesaplanan değerler arasındaki farkları en aza indirecek şekilde ÇATES numunesi için bilyalı değirmende  $a_T$ ,  $\alpha$ ,  $\mu$  ve  $\Lambda$  parametreleri belirlenmiştir. Sonuçta; bilyalı değirmende özgül kırılma hızı model parametre değerleri  $a_T=0,53$ ,  $\alpha=0,57$ ,  $\mu=3,97$  ve  $\Lambda=2,62$  olarak bulunmuştur (Samanlı, 2008).

## 5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Karıştırmalı değirmen ve bilyalı değirmende gerçekleşen özgül kırılma hızları Çizelge 10'da birlikte sunulmuştur.

Çizelge 10. Özgül Kırılma Hızlarının Karşılaştırılması.

Dar Tane Boyut Grubu (mikron)	Karıştırmalı Değ. Kırılma Hızı, $S_i$	Bilyalı Değ. Kırılma Hızı, $S_i$
-3350+2360	0,6382	0,6416
-2360+1700	0,8728	0,6943
-1180+850	0,9359	0,5484
-425+300	1,9757	0,3586
-212+150	1,4385	0,1966

Karıştırmalı değirmende özgül kırılma hızı 425  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimuma ulaşırken, bilyalı değirmende özgül kırılma hızı 2360  $\mu\text{m}$  tane boyutunda maksimum yapmış sonrasında azalmaya başlamıştır. Öğütme deneyleri sonunda elde edilen kırılma hızı parametre değerleri, karıştırmalı değirmende;  $a_T=1,08$  ve  $\alpha=0,51$  olarak hesaplanırken, bilyalı değirmende;  $a_T=0,53$  ve  $\alpha=0,57$  olarak hesaplanmıştır. Değirmene bağlı bir parametre olarak tanımlanan  $a_T$  değerinin büyük olması karıştırmalı değirmende bilyalı değirmene kıyasla daha hızlı öğütmenin, başka bir deyişle daha ince öğütme ürünü eldesinin bir sonucudur.

Literatürde farklı malzemeler için çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda karıştırmalı değirmenlerde öğütme işlemlerinde, doğrusal olmayan öğütme kinetiği geliştiği belirtilmiştir (Mankosa vd, 1986; Orumwense, 1992; Gao ve Forssberg, 1993; Tüzün vd, 1995; Cho vd, 1996; Karbstein vd, 1996; Zhenhua vd, 1998; Bilgili vd, 2006; Bilgili 2007). Başka bir deyişle, kırılma hızı öğütme süresi arttıkça yavaşlama göstermektedir. Karıştırmalı değirmende ÇATES numunesi ile yapılan öğütme deneylerinde karşılaşılan bu sapmanın, bilyalı değirmende de gerçekleşmesi, malzeme özelliğinin kırılma davranış hızının yavaşlamasında etkisi olabileceğini beklentisini ortaya çıkarmıştır. ÇATES numunesinde,



homojen olmayan yapısı gereği daha kolay kırılmaya uğrayan düşük küllü kısmın (kömür özellikli) artan öğütme süresine paralel olarak ince boyuta geçtiği ve oluşan ince ürünün de gerek öğütücü ortam ve gerekse de iri tanelerin üzerini kaplayarak öğütme hızında yavaşlamaya neden olduğu düşünülmüştür. Bu savı desteklemek amacı ile karıştırmalı değirmende çalışılan beş dar tane boyut grubunda 30 sn öğütme yapılmış ve alınan öğütme ürünleri, üst elek boyutunda elenmiş, elek üstü ve elek altı olmak üzere sınıflandırılmıştır. Söz konusu elek altı ve elek üstü ürünlerin kül değerlerine bakılmış ve sonuçlar Çizelge 11’de verilmiştir.

Çizelge 11. Karıştırmalı Değirmende 30 sn Öğütme Sonuçları.

Boyut Grubu (mikron)	EÜ Ağ. %	EÜ Kül %	EA Kül %	Hes. Bes. M. Kül %	Öç. Bes. M. Kül %
-3350+2360	57,89	80,08	51,47	68,03	68,62
-2360+1700	52,52	72,87	48,25	61,18	61,59
-1180+850	47,70	67,81	40,42	53,48	53,89
-425+300	31,58	51,29	32,88	38,69	39,45
-212+150	50,11	43,33	32,11	37,73	36,85

Çizelge 11 incelendiğinde, beş dar tane boyut grubunda kırılarak elek altına geçen kısımlara ait kül değerleri elek üstünde kalanlardan daha düşük bulunmuştur. Yani, ÇATES numunesinde mevcut homojen olmayan yapı içindeki düşük küllü (kömür özellikli) kısım yüksek küllü (şist özellikli) kısma göre daha hızlı kırılmaya uğramıştır. Sonuçta; gelişen öğütme süresine paralel olarak, elek üstünde kalan kısım daha zor öğütülebilir özellikli olan şistlerden ibaret olmakta, kırılma davranışı yavaşlamakta ve doğrusal kırılma davranışından sapma ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca; ÇATES numunesinin Bond bilyalı değirmende yapılan deneyler sonucunda Bond iş indeksi 16,93 kWs/t ve Hardgrove cihazı ile yapılan deneyler sonucunda da Hardgrove indeksi (HGI) 77,45 olarak belirlenmiştir (Samanlı, 2008).

## 6. SONUÇLAR

Değirmene bağlı kırılma parametre değeri olarak tanımlanan  $a_T$ , karıştırmalı değirmende 1,08 ve bilyalı değirmende 0,53 olarak hesaplanmıştır. Karıştırmalı değirmene ait  $a_T$  değerinin daha yüksek çıkması -212+150  $\mu\text{m}$  ve -425+300  $\mu\text{m}$  dar tane boyut gruplarında, karıştırmalı değirmen lehine yaklaşık olarak sırasıyla 7 ve 5,5 kat hızlı gerçekleşen kırılma davranışının, başka bir deyişle daha ince öğütme ürünü eldesinin bir sonucudur.

Laboratuar ölçekli karıştırmalı değirmende, “Bilya çapı/Değirmene beslenen maksimum tane boyutu” arasında yaklaşık 2,5 gibi oransal yaklaşım olduğunda kırılma hızının optimal değere ulaşabileceği belirlenmiştir.

ÇATES numunesinde, homojen olmayan yapısı gereği, kırılma davranışında gerçekleşen doğrusallıktan sapma, literatürde belirtilen malzeme özelliğinin kırılma davranış hızının yavaşlamasında etkisi olabileceği savını desteklemektedir.

## TEŞEKKÜR

Yazar, katkıları için Yrd. Doç. Dr. Dilek Çuhadaroğlu, Doç. Dr. Sait Kızıgut, Prof. Dr. İhsan Toroğlu/ Zonguldak Karaelmas Üni. Maden Müh. Böl., Prof. Dr. Levent Ergün/Hacettepe Üni. Maden Müh. Böl., Doç. Dr. Halil İpek, Prof. Dr. Yaşar Uçbaş/Osmangazi Üni. Maden Müh. Böl. ve karıştırmalı değirmen deney setinin kurulmasını sağlayan Dr. C. Cengiz Pilevneli’ye teşekkürü bir borç bilir.

## KAYNAKLAR

Austin, L. G., 1971; “A review introduction to the mathematical description of grinding as a rate process”, Powder Technology, **5**, 1-17.

Austin, L. G. ve Bahatia V. K., 1971; “Experimental methods for grinding studies in laboratory mills”, Powder Technology, **5**, 261-266.

Austin, L. G., Shoji K., Bahatia V. K., Jindal V., Savage K. ve Klimpel R. R., 1976; “Some results on the description of the size reduction as a rate process in various mill”, Ind. Eng. Chem. Process Des. Devel, **15**, 187-196.

- Austin, L. G., Shoji K. ve Bell D., 1982; "Rate equations for non-linear breakage in mills due to material effects", *Powder Technology*, **31**, 127-133.
- Austin, L. G., Klimpel R. R. ve Luckie P. T., 1984; "The process engineering of size reduction: ball milling", *SME-AIME*, New York, 561.
- Bilgili E., 2007; "On the consequences of non-first-order breakage kinetics in comminution processes: absence of self-similar size spectra", *Particle&Particle Systems Characterization*, **24**, 12-17.
- Bilgili E., Hamey R. ve Scarlett B., 2006; "Nano-milling of pigment agglomerates using a wet stirred media mill: Elucidation of the kinetics and breakage mechanism" *Chemical Engineering Science*, **61**, 149-157.
- Blecher L. ve Schwedes J., 1996; "Energy distribution and particle trajectories in a grinding chamber of a stirred ball mill", *International Journal of Mineral Processing*, **44**, 617-627.
- Bond F. C., 1951; "Third theory of comminution", *Trans. AIME*, **193**, 484-494.
- Bowdish F. K., 1960; "Theoretical and experimental studies of kinetics of grinding in a ball mill", *Trans. SME/AIME*, **217**, 194-202.
- Celep O. ve Alp İ., 2008; "Karıştırmalı değirmenler ile ince öğütmenin refrakter altın cevherlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi", *Madencilik*, **47(3)**, 15-26.
- Cho H., Waters M. A. ve Hogg R., 1996; "Investigation of the grind limit in stirred media milling", *International Journal of Mineral Processing*, **45**, 607-615.
- Deniz V., 2004; "Relationship between bond's grindability and breakage parameters of grinding kinetic on limestone", *Powder Technology*, **139**, 208-213.
- Dikmen S. ve Ergün Ş. L., 2004; "Karıştırmalı bilyalı değirmenler", *Madencilik*, **43(4)**, 3-15.
- Ding Z., Yin Z., Liu L. ve Chen Q., 2007; "Effect of grinding parameters on the rheology of pyrite-haptane slurry in a laboratory stirred media mill", *Minerals Engineering*, **20**, 701-709.
- Erdem A. S., Ergün Ş. L. ve Benzer H., 2007; "Modelleme ve simulasyon yardımıyla çimento öğütme devresi tasarımı ve kamaralı bilyalı değirmen seçimi", *Madencilik*, **46(4)**, 21-30.
- Fadhel H. ve Frances C., 2001; "Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill", *Powder Technology*, **119**, 257-268.
- Fuerstenau D. W., De A. ve Kapur P. C., 2004; "Linear and nonlinear particle breakage process in comminution systems", *International Journal of Mineral Processing*, **74**, 317-327.
- Gao M. W. ve Forssberg E., 1993; "A study on the effect of parameters in stirred ball milling", *International Journal of Mineral Processing*, **37**, 45-59.
- İpek H., Üçbaş Y., Yekeler M. ve Hoşten C., 2005; "Dry grinding kinetics of binary mixtures of ceramic raw materials by bond milling", *Ceramic International*, **31(8)**, 1065-1071.
- Jankovic A., 2003; "Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills" *Minerals Engineering*, **16**, 337-345.
- Jankovic A. ve Sinclair S., 2006; "The shape of product size distributions in stirred mills", *Minerals Engineering*, **19**, 1528-1536.
- Karbstein H., Müler F. ve Polke R., 1996; "Scale-up for grinding in stirred ball mills", *Aufbereitungs-Technick*, **37(10)**, 469-479.
- Klimpel R. R. ve Austin L. G., 1970; "Determination of selection for breakage functions in the batch grinding equation by nonlinear optimization", *Ind. Eng. Chem. Fundam*, **9(2)**, 230-237.
- Kwade A (1999) *Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application*. *Powder Technology*, 105: 14-20.
- Kwade A. ve Schwedes J., 2002; "Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills", *Powder Technology*, **122**, 109-121.
- Liddell K. S., 1986; "Machines for fine milling to improve the recovery of gold from calcines and pyrite, Proceeding of the international conference

on gold”, Extractive Metallurgy of Gold, **2**, 405-417.

Lynch A. J., Whiten W. J. ve Narayanan S. S., 1986; “Ball mill models: Their evaluation and present status. Advances in Mineral Processing”, SME/AIME Pub., Littleton, C O, 48-66.

Makokha A. B. ve Moys M. H., 2006; “Towards optimising ball-milling capacity: effect of lifter design”, Minerals Engineering, **19**, 1439-1445.

Mankosa M. J., Adel G. T. ve Yoon R. H., 1986; “Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal”, Powder Technology, **49**, 75-82.

Mankosa M. J., Adel G. T. ve Yoon R. H., 1989; “Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal”, Powder Technology, **59**, 255-260.

Miranda S. ve Yaeger S., 1998; “Homing on the best size reduction method”, Chemical Engineering, **105**, 102-110.

Orumwense O. A. ve Forssberg E., 1992; “Super-fine and ultra-fine grinding - a literature survey”, Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, **11(1)**, 107-127.

Özkan A. ve Yekeler M., 2003; “Fine dry grinding of zeolite in a laboratory ball mill”, Particle&Particle Systems Characterization, **20**, 276-282.

Prasher C. L., 1987; “Crushing and Grinding Process Handbook”, John Wiley&Sons Ltd., GB, 474.

Roberts E. J., 1950; “The probability theory of wet ball milling and it’s applications”, Trans. SME/AIME, **187**, 267-272.

Samanlı S., 2008; “Zonguldak-Çatalağzı Termik Santralı Katı Fosil Yakıtı Öğütme Kinetiğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 177.

Sinnott M., Clearly P. W. ve Morrison R., 2006; “Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 1- media motion, energy consumption and collisional environment”, Minerals Engineering, **19**, 1537-1550.

Sönmez B., 1992; “Gümüş Cevherinin Kırılma Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi ve Öğütme Devresinin Benzetimi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara, 112.

Teke E., Yekeler M., Ulusoy U. ve Canbazoğlu M., 2002; “Kinetics of dry grinding of industrial minerals: calcite and barite”, International Journal of Mineral Processing, **67**, 29-42.

Tuzun M. A., Loveday B. K. ve Hinde A. L. 1995; “Effect of pin tip velocity, ball density and ball size on grinding kinetics in a stirred ball mill”, International Journal of Mineral Processing, **43**, 179-191.

Wang Y. ve Forssberg E., 2000; “Product size distribution in stirred media mills”, Minerals Engineering, **13**, 459-465.

Yang R. Y., Jayasundara C. T., Yu A. B. ve Curry D., 2006; “DEM Simulation of the flow of grinding media in Isa mill”, Minerals Engineering, **19**, 984-994.

Yerlikaya A., 1994; “Bilyalı Değirmenlerde Bilya Dağılımının Matematiksel Model Yardımıyla Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 88.

Young M. F. ve Gao M., 2000; “Performace of the Isa Mills in the George Fisher flowsheet”, Proceedings of AusIMM Seventh Mill Operators’ Conference, Australia, 75-81.

Yue J. ve Klein B., 2005; “Particle breakage kinetics in horizontal stirred mills”, Minerals Engineering, **18**, 325-331.

Zhenhua M., Sian H., Shaoming Z. ve Xinzhang P., 1998; “Breakage behavior of quartz in a laboratory stirred ball mill”, Powder Technology, **100(1)**, 69-73.

## TEKNİK NOT

### LİNYİTLERİN KURU ZENGİNLEŞTİRMESİNDE TABLA TÜRÜ HAVALI AYIRICININ İŞLEM DEĞİŞKENLERİNİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Investigation of the Effect of Operational Parameters of Table-Type Air Separator in Dry Concentration of Lignite

Geliş (received) 06 Ağustos (August) 2009; Kabul (accepted) 20 Kasım (November) 2009

Murat Kademli <sup>1</sup>  
Derya Kalyon <sup>2</sup>  
Özcan Yıldırım Gülsoy <sup>3</sup>

#### ÖZET

Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli tabla türü havalı bir ayırıcı deney düzeneği kurulmuş ve Yeniköy - Hisarönü linyit yatağından elde edilen numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Ayınma etkisi olduğu düşünülen tabla eğimi, besleme hızı ve tabla frekansı parametreleri 3 farklı kadernede denenerek, toplam 27 farklı deney koşulunda çalışma yapılmıştır. En başarılı sonuçların elde edildiği 9 koşulda, Soma- Eynez yatağından alınan numuneler üzerinde deneyler tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, genel olarak besleme hızı ve tabla eğimindeki artışın ağırlık veriminde ve yanabilir veriminde artışa, buna karşın atılan toplam kül miktarı ve temiz kömür kalori değerlerinde ise düşüşe neden olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda tabla frekansındaki artışın, besleme hızı ve eğimin etkisinin zıt yönünde davranım gösterdiği belirlenmiştir. Yeniköy- Hisarönü ve Soma – Eynez linyit numuneleri ile yapılan deneyler sonucunda EP ve ayırım yoğunluğu ( $d_{50}$ ) değerleri sırasıyla, 0,165 ve 1,67 g/cm<sup>3</sup> ile 0,19 ve 1,67 g/cm<sup>3</sup> olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Havalı Ayırıcı, Linyit, Kuru Zenginleştirme

#### ABSTRACT

In this study, a laboratory-scale, table-type air separator was set up and experiments were conducted with Yeniköy- Hisarönü lignite samples. Three principal parameters which were thought to influence the separation, namely, the table slope and frequency, and feed rate were tested at three levels in a total of 27 different experimental conditions. Experiments were re-applied on Soma – Eynez lignite samples under nine most successful experimental conditions which were determined after Yeniköy - Hisarönü tests, and the results were compared with each other.

As a result of the investigation, it has been observed that the feed rate and the table slope usually tend to increase weight recovery and combustion recovery while they decrease the total amount of waste ash and clean coal calorific values. It has also been observed that the effect of increasing the table frequency contradicts with that of the feed rate and slope. Results of experiments show that EP value and separation density ( $d_{50}$ ) were calculated as 0,165 and 1,67 with Yeniköy-Hisarönü lignite sample, 0,19 and 1,67 with Soma – Eynez lignite sample.

**Keywords:** Air Separator, Lignite, Dry Concentration

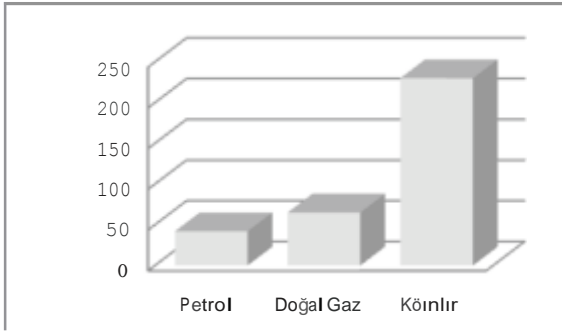
\* Öğr.Gör.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Hacettepe Meslek Yüksekokulu Müd. ANKARA, kademli@hacettepe.edu.tr

\*\* Arş.Gör., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, ANKARA

\*\*\* Prof.Dr., Hacettepe Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Maden Müh. Bölümü, ANKARA

## 1.GİRİŞ

Kömür ana element olarak karbon, hidrojen ve oksijenin birleşiminden oluşan, yanabilen sedimanter organik bir kayadır. Kömür günümüzde en önemli enerji kaynağıdır ve yakın gelecekte de bu özelliğini sürdürmeye devam edecektir. Enerji kaynaklarının kullanımı dünya gelir dağılımının değişmesine neden olmaktadır. Bu kaynaklar içinde kömür, rezerv ömrü bakımından birinci ve tüketimin karşılanması bakımından ikinci en önemli enerji kaynağıdır. Fosil yakıtların tükeniş süresi Şekil 1'de verilmektedir (Tüylüoğlu vd, 2004; Arslan vd, 2004).



Şekil 1. Dünya fosil kaynaklarının tahmini tükeniş süresi.

Enerji üretimi anlamında hammadde olarak göz önüne alındığında ise kömürün petrolden sonra ikinci sırada olduğu görülmektedir. Dünya enerji tüketiminde kaynak payları Şekil 2'de verilmektedir (Arslan vd, 2004).



Şekil 2. Dünya birincil ticari enerji tüketiminde kaynak payları.

Türkiye'de bulunan linyitlerde orijinal halde kül içerikleri genel de yüksek olduğundan ısınmada ve sanayide kullanılması halinde büyüksorunlarla karşılaşmaktadır. Özellikle hava ve çevre kirliliğini önleyici kanunların katı standartları karşısında enerji gereksinimlerinin karşılanması

için etkili kömür temizleme teknolojilerinin uygulanması zorunlu hale gelmiştir.

Kömürün temizlenmesi, birlikte bulunduğu yan taşların kömürden ayıklanması anlamına gelmektedir. Bu yan taşlar silikatlı kayalar ve karbonatlı kayalarolabileceği gibi, kükürt, bazen de kömür bünyesindeki kükürdün artmasına neden olan sülfürlü demir mineralleri (Pirit,  $FeS_2$ ) olabilir.

Kömürden yan taşların ayrılması, kömürün yoğunluğu ile yan taşların yoğunluğu arasındaki farktan yararlanılarak gerçekleştirilmektedir. Ortam yoğunluğunu kömür ve yan taşın yoğunlukları arasında ayarlamak amacıyla ince öğütülmüş manyetit ( $5.2 \text{ gr/cm}^3$ ), su ile istenilen oranda karıştırılır. Bu işlemlerde yüksek miktarda su kullanımı, ayırma işlemini takiben suyun kömürden ayrılması ayrıca su ile kömür yapısında bulunan ince tanelerin oluşturduğu çamurun da atık barajlarında depolanması gerekmektedir.

Bazı bölgelerde su sıkıntısının bulunması, çamurların depolanmasından çıkan çevresel sorunlar, işletme maliyetinin düşük olması, susuzlandırma için ek devre gerektirmemesi gibi sebepler nedeniyle kuru yöntemlerle kömürlerin temizlenmesi, günümüzde önem kazanmaya başlamıştır. Çok yaygın olmamakla birlikte endüstriyel olarak uygulanan kuru kömür zenginleştirme yöntemleri mevcuttur.

Bazı özel durumlarda kömürün içerdiği demir sülfür yapısı ısı işlemleriyle değiştirilerek manyetik alınganlığı artırılmakta ve manyetik ayırma ile ayrılabilir (Liu ve Lin, 1976; De Jong vd, 2003; Arslan, 2006).

Genellikle baca gazlarından toz tutma amacıyla yaygın olarak kullanılan elektrostatik ayırma yöntemi, 3 mm'nin altında kömürün yan taştan ayrılması amacıyla kullanılmaktadır (Donnelly, 1999; Maoming vd, 2003; Trigwell vd, 2003).

Kömürün kuru ayırımında en geniş uygulama alanı bulan yöntem, akışkan yatak sistemleridir. 1930'ların başlarında Fraser hava-kum prosesinde havayı 1,68 mm' den küçük boyuttaki kumu akışkanlaştırmak üzere kullanmış ve böylece ağır ortam ayırmasını oluşturmuştur (Osborne, 1988; Alderman, 2001).

Ancak günümüzde kullanılan akışkan yatak

sistemlerde ince öğütülmüş (381-ım) manyetit yatak oluşturmakta kullanılmaktadır. Oluşturulan yatak içine kömürle karışık yan taş beslenmekle ve akışkan yatağın yoğunluğundan ağır olan yan taşlar oluşan yatağın dibine çökerken, kömür üst kısımda toplanmaktadır (Fan vd, 2003; Xu ve Guan, 2003; Chen ve Yang, 2003; Zhenfu vd, 2008).

Tabla türü havalı ayıncılarda ise ayırım yüzeyinin alt tarafından sisteme sağlanan basınçlı hava ile yataklanma oluşturulurken sisteme bağlanan bir tahrik motoru ve destek üniteleri sayesinde sarmal bir hareket kazandırılan tanelerin yoğunluk farkından faydalanarak ayrılmaları sağlamaktadır (Donnelly, 1999).

Kuru zenginleştirme yöntemlerinde sisteme su sağlanması, tesisten çıkan kirli suyun atılması ve geri kazanımı için gereksinim yoktur. Bu yüzden, ince ve sulutesis atıkları için atık havuzları ortadan kalkmaktadır. Kuru ayırma işlemi sırasında kömürün nem oranı artmaz. Kuru yöntemlerde elde edilen üründe tozlaşma ve ufalanma daha küçük oranlarda gerçekleşmektedir. Su olmayan bölgelerde tesis kurulmasına imkan yaratır. Kış günlerinde yaş yöntemlerde görülen donma problemleri yaşanmaz. Ancak, ayırma verimleri yaş yöntemlere kıyasla düşüktür. Özellikle ince boyutlarda kuru kömürün elenmesi problem yaratabilir. Kırma, eleme ve diğer ayırma işlemlerinde toz oluşmakta ve bu nedenle sistemlerin kapalı yapılması ve toz giderme ünitesi gerektirmektedir (Arslan, 2006).

Bu çalışmada, literatürde tabla türü havalı ayıncı olarak tanımlanan ayırıcıya benzer şekilde tasarlanan, deney düzeneği ile iki farklı linyit yatağından alınan numunelere uygulanabilirliği ve işlem değişkenlerinin ayırım performansına etkisi ortaya konulmaktadır. Ayrıca, iki numune ile elde edilen sonuçlar Tromp eğrileri kullanılarak karşılaştırılmaktadır.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1. Deney Düzeneği

Literatür incelemesi sonucunda, linyit ve yan taşların birbirinden kuru zenginleştirme ile ayrılması için yurt dışında kullanım alanı bulunmuş tabla türü havalı ayırıcılara benzer şekilde deney düzeneği tasarlanmıştır.

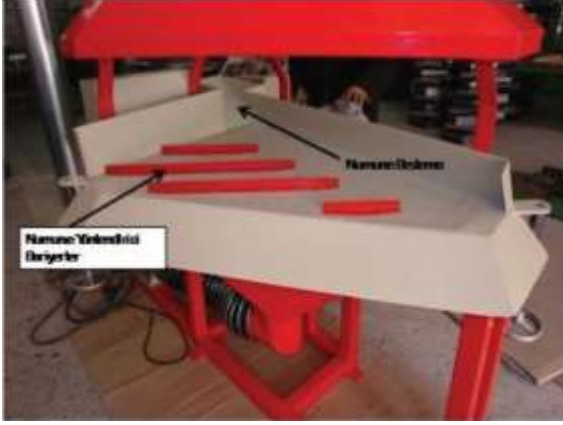
Deney düzeneği, yüzeyinde numune akışını

sağlayacak şekilde titreşim veren tahrik mekanizması ve akışkan yatağın oluşturulması amacıyla sisteme hava sağlama için eklenen bir fana sahiptir. Deney düzeneğinin genel görünümü Şekil 3'de verilmektedir. Düzenek, dörtgen bir yamuk yüzey ve bu yüzey üzerinde 3 mm çapında hava geçişine imkan sağlayan eşit dağıtılmış delikli alana sahiptir. Ayrıca, tabla yüzeyinin eğimini ayarlayabilmek ve verilecek tahrik'in tabla yüzeyine aktarılabilmesi için tabla altına yerleştirilmiş amortisörler mevcuttur. Düzenek çelik profillerden oluşan bir gövde üzerine yerleştirilmiş ve yere sabitlenmesi sağlanmıştır. Beslenen numunenin tabla yüzeyindeki hareketlerinin kontrol edilebilmesi amacıyla tabla yüzeyine yönlendirici bariyerler yerleştirilmiştir. Şekil 4'de tabla yüzeyi, yönlendirici bariyerler ve düzeneği taşıyan profiller görülmektedir.

Tabla frekansı ve fan tarafından sağlanacak havanın kontrol edilebilmesi için eklenen iki adet elektronik motor frekans kontrol cihazı Şekil 5'de görülmektedir. Ayrıca, düzeneğe hız kontrollü titreşimli besleyici Şekil 6'da görüldüğü biçimde yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği genel görünüm.



Şekil 4. Deney düzeneği tabla düzeyi



Şekil 5. Deney düzeneği kontrol sistemi



Şekil 6. Deney düzeneği besleme sistemi.

## 2.2. Deney Numuneleri

Deneylerde kullanılan Yeniköy – Hisarönü ve Soma – Eynez linyit numunelerinin tam analizleri sırasıyla, Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmektedir.

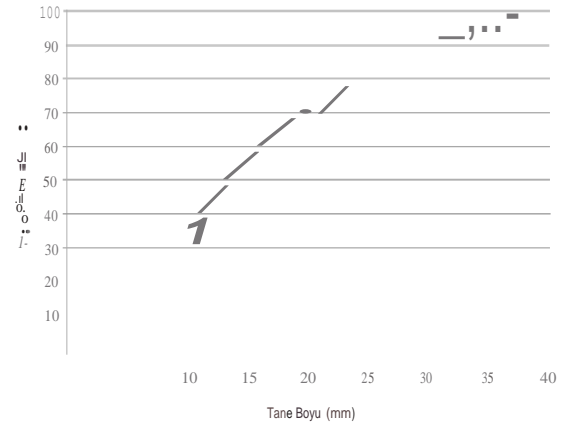
Çizelge 1. Yeniköy-Hisarönü Linyit Numunesi Tam Analizi

Analiz Tipi	Orijinal Baz	Kuru Baz
Toplam Nem	6,98	
%, Kül	42,56	45,75
%, Uçucu Madde	37,59	40,41
%, Toplam Kükürt	2,54	2,73
üst Isıl Değer (Kkal/kg)	1666	1791
Alt Isıl Değer (Kkal/kg)	1474	1630

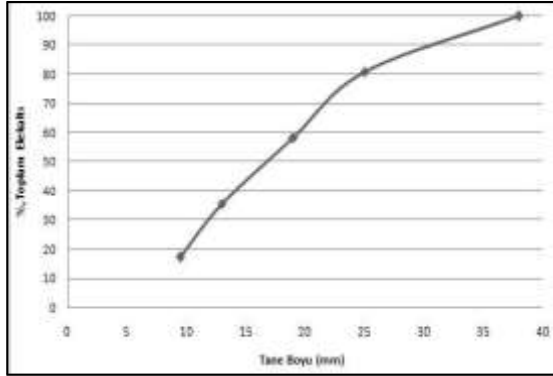
*\*Numune özellikle uzun süre bekletilmiştir.*

Çizelge 2. Soma-Eynez Numunesi Analiz Sonuçları

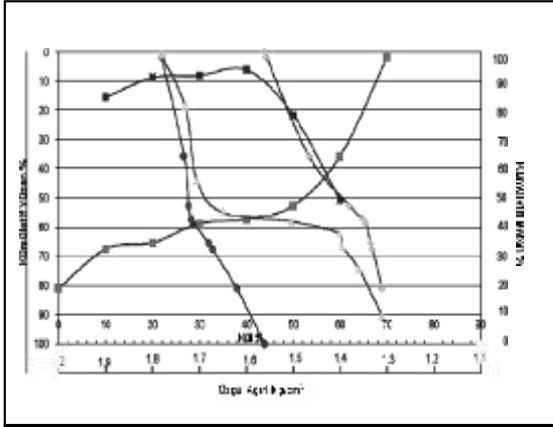
Analiz Tipi	Orijinal Baz	Kuru Baz
Toplam Nem	14,53	
%, Kül	31,57	36,94
%, Uçucu Madde	34,45	41,04
%, Toplam Kükürt	2,04	2,43
üst Isıl Değer (Kkal/kg)	2622	3068
Alt Isıl Değer (Kkal/kg)	2375	2881



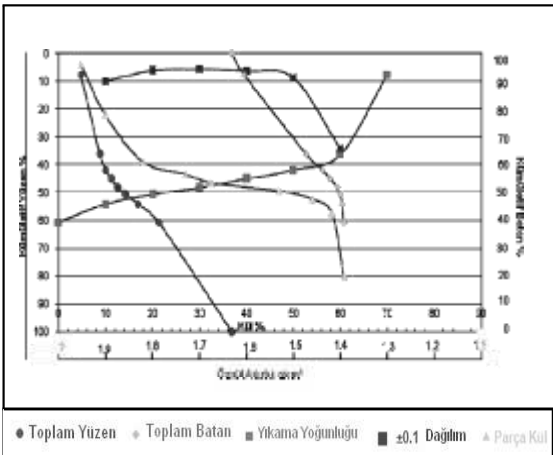
Şekil 7. Yeniköy-Hisarönü linyit numunesi tane boyu dağılımı.



Şekil 8. Soma-Eynez numunesi tane boyu dağılımı.



Şekil 9. Yeniköy-Hisarönü numunesi yıkanabilirlik eğrileri.



Şekil 10. Soma-Eynez numunesi yıkanabilirlik eğrileri.

### 2.3. Deneysel Koşulların Tespiti

Düzenek çalışır duruma getirilmesi ve işlem değişkenlerinin tanımlanabilmesi için ön deneyler yapılmış, incelenecek parametreler tabla eğimi, tabla frekansı ve besleme hızı olarak belirlenmiştir.

Tüm parametrelerin birbirleri ve zenginleştirme işlemi ile ilişkilerini ortaya koymak açısından her bir parametrenin en az 3 değişik kademede incelenmesi gerekli görülmüştür. Belirlenen deney parametreleri Çizelge 3'de verilmektedir.

Çizelge 3. Deneysel Parametreleri

Parametre	Tabla Eğimi	Besleme (ton/saat- m <sup>2</sup> )	Tabla Frekansı (Hz)
1.kademe	0,15 (8,5°)	1,32	39
2.kademe	0,21 (11,8°)	1,68	42
3.kademe	0,26 (14,6°)	2	45

Yeniköy – Hisarönü linyit numunesi kullanılarak yapılan deneylerde 3 farklı parametrenin 3 farklı kademede incelenmesi sonucunda, 27 farklı koşul denenmiştir. En başarılı sonuçların elde edildiği 9 koşulda Soma – Eynez linyit numunesi üzerinde deneyler tekrarlanmıştır.

Düzenek yeni tasarlandığından ve ilk çalışmalar olması nedeni ile besleme neminin olumsuz etkisinin öncelikle ortadan kaldırılması amacıyla, numuneler uzun süreli bekletilmiş ve nem oranının düşmesi sağlanmıştır. Çizelge 4 ve 5'de sırasıyla, Yeniköy – Hisarönü ve Soma – Eynez numuneleri ile yapılan deneylerin koşulları verilmektedir.



**Çizelge 4. Yeniköy – Hisarönü Numunesi Deney Koşulları**

Deney No	Tabla Eğimi	Besleme Hızı (ton/saat- m <sup>2</sup> )	Tabla Frekansı (Hz)
1	0,15	1,32	45
2	0,15	1,32	42
3	0,15	1,32	39
4	0,15	1,68	45
5	0,15	1,68	42
6	0,15	1,68	39
7	0,15	2	45
8	0,15	2	42
9	0,15	2	39
10	0,21	1,32	45
11	0,21	1,32	42
12	0,21	1,32	39
13	0,21	1,68	45
14	0,21	1,68	42
15	0,21	1,68	39
16	0,21	2	45
17	0,21	2	42
18	0,21	2	39
19	0,26	1,32	45
20	0,26	1,32	42
21	0,26	1,32	39
22	0,26	1,68	45
23	0,26	1,68	42
24	0,26	1,68	39
25	0,26	2	45
26	0,26	2	42
27	0,26	2	39

**Çizelge 5. Soma – Eynez Numunesi ile Tekrarlanan Deney Koşulları**

Deney No	Tabla Eğimi	Besleme (ton/saat -m <sup>2</sup> )	Tabla Frekans
1	0,15	1,32	45
2	0,15	1,32	42
3	0,15	1,32	39
4	0,15	1,68	45
5	0,15	1,68	42
6	0,15	1,68	39
7	0,15	2	45
8	0,15	2	42
9	0,15	2	39

#### 2.4. Deneylerin Yapılışı

Hazırlanan Linyit numuneleri, titreşimli besleyici yardımıyla daha önceden belirlenen parametrelere uygun olarak tabla yüzeyine beslenmiş ve tabla yüzeyinden dökülen numuneler ön deneyler sırasında belirlenen bölümlerden temiz kömür ve atık olarak iki parça halinde alınmıştır. Her deney koşulunun denenmesinden önce gerekli parametre değişiklikleri yapılmış,

numune eksilmeleri tamamlanmış, düzeneğe ve numune kapları temizlenerek sistem yeniden çalıştırılmıştır. Elde edilen temiz kömür ve atık numuneleri tartılıp, bölücü yardımıyla bölünerek en az 1 kg olacak şekilde numuneler alınmış, 250 µm boyutuna kadar merdaneli kırıcı ve halkalı değirmen yardımı ile öğütülmüştür. Elde edilen tüm temiz kömür ve atık numunelerinin kül içeriği, kalori değerleri ve nem içerikleri analiz edilmiştir. Şekil 11'de Yeniköy - Hisarönü numunesi ile yapılan 5. deney sonucunda elde edilen numuneler gösterilmektedir.



**Şekil 11. Deney 5 - temiz kömür ve atık**

### 3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Deney düzeneğinin verimli bir şekilde çalışması için parametrelerin en uygun koşullara ayarlanması son derece önem taşımaktadır. Bu sebeple, parametrelerin ayırma olan etkilerinin incelenmesi ve en başarılı koşulların tespit edilmesi amacıyla yanabilir verim ve toplam atılan kül oranlarına karşılık tabla eğimi, tabla frekansı ve besleme hızının etkilerinin incelenebileceği grafikler verilmektedir.

Ayrıca her deney koşulunda elde edilen alt ısı değerleri Kkal/kg olarak grafikte deney koşulunu temsil eden noktaların üzerine yerleştirilmiştir. Bu sayede her deney koşulunda elde edilen yanabilir verim, toplam atılan kül oranı ve elde edilen alt ısı kalorisi değerleri bir arada değerlendirilebilmektedir. Aşağıdaki şekillerde düz çizgi ile ifade edilenler yanabilir verimi, uzun kesikli çizgi ile ifade edilenler ağırlık verimini ve kesikli çizgi ile ifade edilenler toplam atılan kül oranını göstermektedir.



### 3.1. Yeniköy-Hisarönü Numunesi Sonuçları

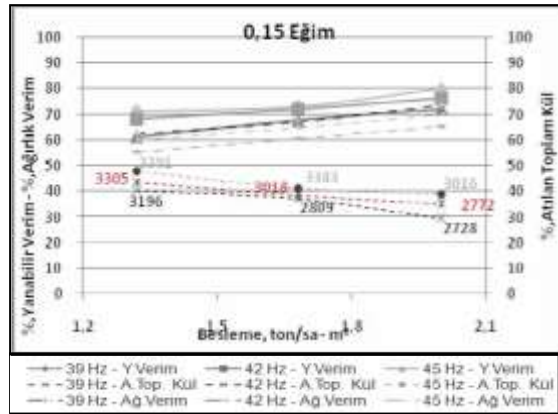
Tabla eğiminin, yanabilir verim ve atılan toplam kül miktarına etkisinin incelenmesi amacıyla, 2 ton/saat - m<sup>2</sup>, 1,68 ton/saat - m<sup>2</sup> ve 1,32 ton/saat-m<sup>2</sup> besleme miktarlarında ve 39 Hz, 42 Hz ve 45 Hz tabla frekansı koşullarında elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 12 ile 20 arasında verilmektedir. Elde edilen temiz kömürlere ait analiz sonuçları Çizelge 6'da verilmektedir.

Çizelge 6. Yeniköy-Hisarönü Numunesi Analiz Sonuçları

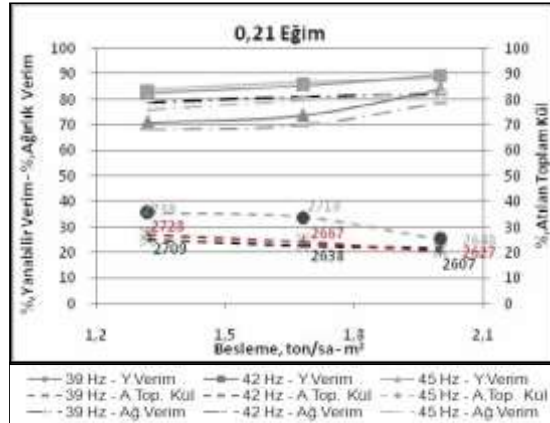
s. no	1	2	3	4	5	6	7
s. no	Alt Isıl Kal	% Mkon	%Kkül	%Akül	%Yan. Verim	% Top. At. Kül	Atık Kalori
1	3391	55,4	38,04	51,40	61,30	52,10	786
2	3305	59,8	36,25	52,53	68,08	47,99	642
3	3196	62,5	36,31	53,82	71,08	45,87	606
4	3383	60,5	37,41	52,09	67,62	46,76	702
5	3018	64,9	37,94	53,20	71,92	42,44	686
6	2809	66,9	38,83	52,45	73,08	39,46	696
7	3016	65,1	38,03	53,14	72,04	42,15	622
8	2772	69,7	38,74	54,10	76,25	37,26	611
9	2728	73,8	39,41	54,93	79,85	32,71	589
10	2739	68,1	41,61	49,10	71,01	35,60	1086
11	2728	75,9	39,04	55,84	82,62	30,59	541
12	2709	78,9	40,44	53,31	83,92	25,56	626
13	2718	69,8	40,85	51,28	73,73	35,20	882
14	2667	79,8	40,08	54,49	85,39	25,02	513
15	2638	81,2	40,31	53,91	86,55	23,03	488
16	2648	78,8	40,21	52,08	84,13	25,09	543
17	2627	83,2	39,80	56,82	89,44	21,69	410
18	2607	82,1	39,79	55,91	88,27	22,75	458
19	2552	84	40,04	57,98	89,94	21,08	426
20	2570	81,7	39,87	56,24	87,73	23,39	487
21	2505	84,8	40,72	56,02	89,77	19,35	479
22	2492	86,9	39,45	57,48	93,96	17,11	406
23	2368	88,1	41,49	55,81	92,05	15,09	484
24	2417	84,1	40,86	54,86	88,82	19,82	669
25	2365	85,5	41,19	55,46	89,79	18,28	694
26	2279	88,9	41,27	56,52	93,23	14,26	432
27	2079	87,8	42,49	54,68	90,17	15,16	710

Burada;

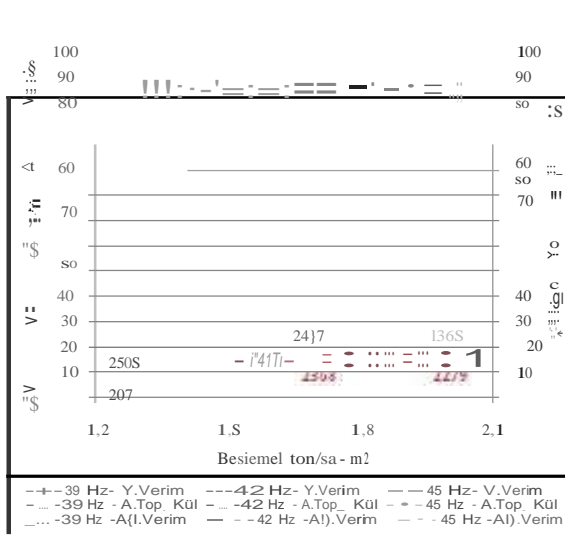
- 1) Temiz kömür Alt Isıl Kalori Değeri (Kkal/kg)
- 2) Temiz kömür Ağırlığı (%)
- 3) Temiz kömür Kül Oranı (%)
- 4) Atık Kül Oranı (%)
- 5) Yanabilir Verim (%)
- 6) Toplam Atılan Kül Oranı (%)
- 7) Atık Alt Isıl Kalori Değeri (Kkal/kg)' dir.



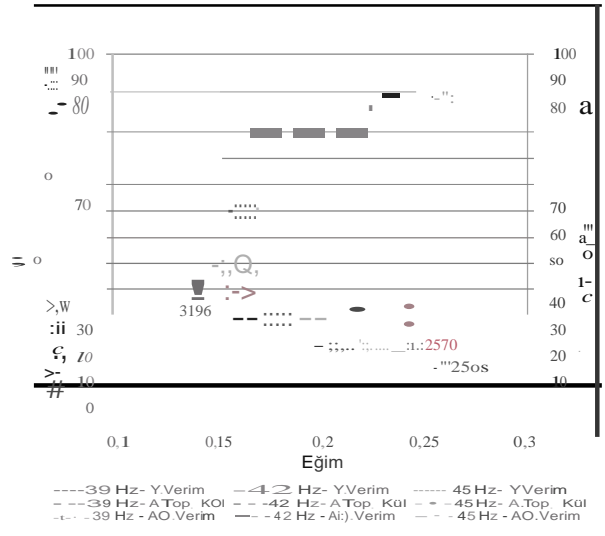
Şekil 12. Besleme – yanabilir verim, ağırlık verim, atılan top kül oranı (0,15 Eğim).



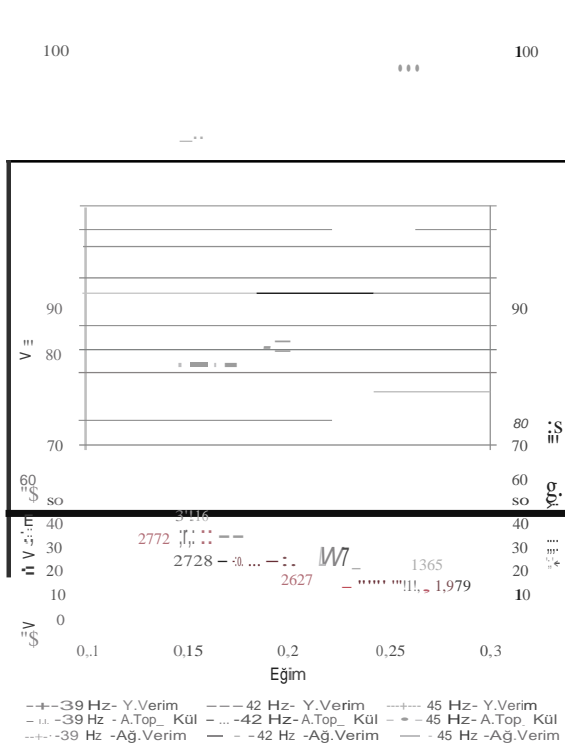
Şekil 13. Besleme – yanabilir verim, ağırlık verim, atılan top kül oranı (0,21 Eğim).



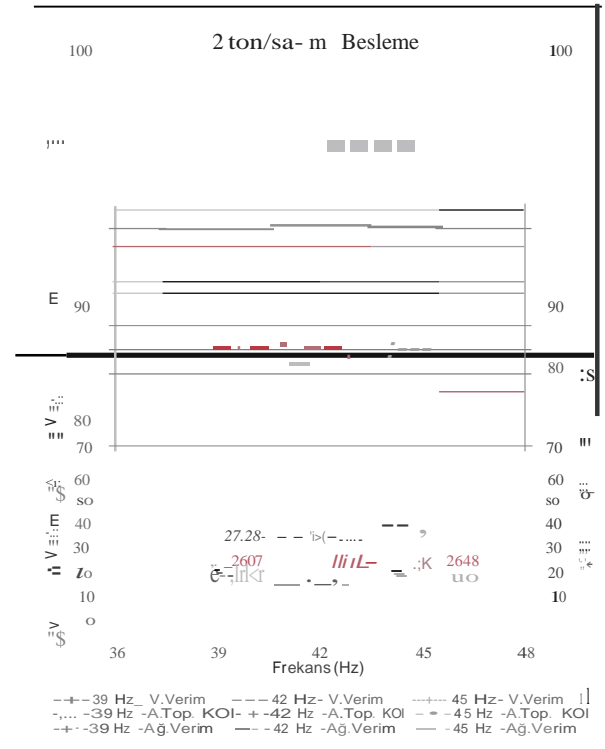
Şekil 14. Besleme - yanabilir verim, ağırlık verim, atılan top kül oranı (0,26 Eğim).



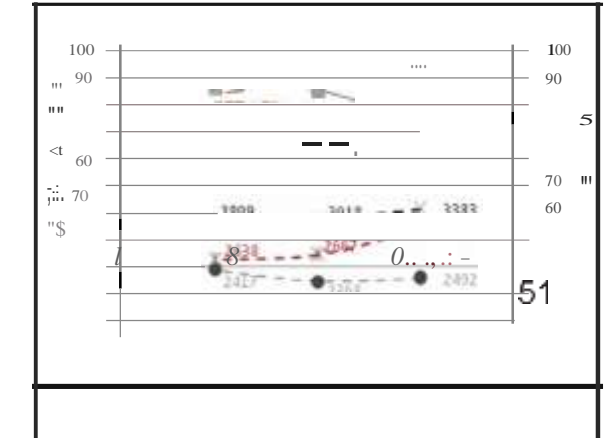
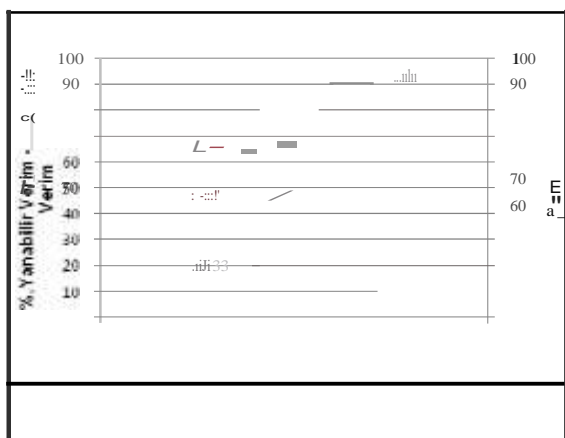
Şekil 17. Tabla eğimi-yanabilir verim, atılan toplam kül oranı ( 1,32 ton/saat - m<sup>2</sup> ).

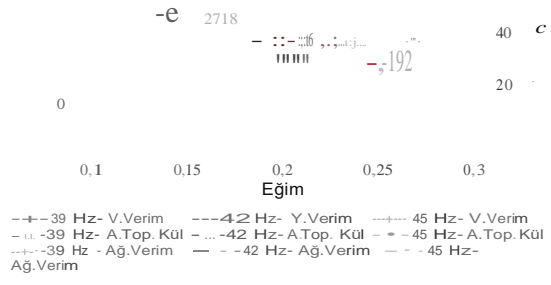


Şekil 15. Tabla eğimi-yanabilir verim, atılan toplam kül oranı ( 2 ton/saat - m<sup>2</sup> ).

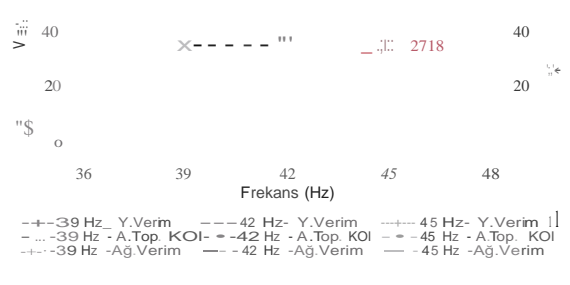


Şekil 18. Tabla frekansı-yanabilir verim, toplam atılan kül oranı ( 2 ton/saat - m<sup>2</sup> ).

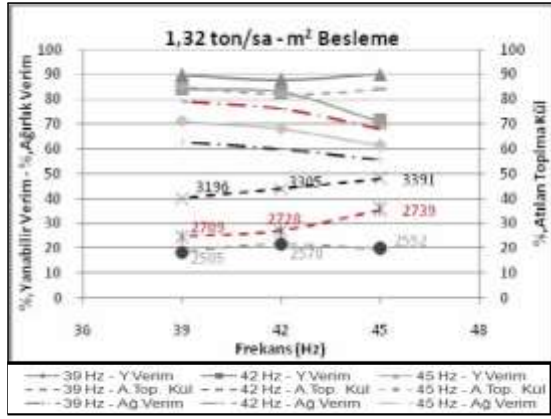




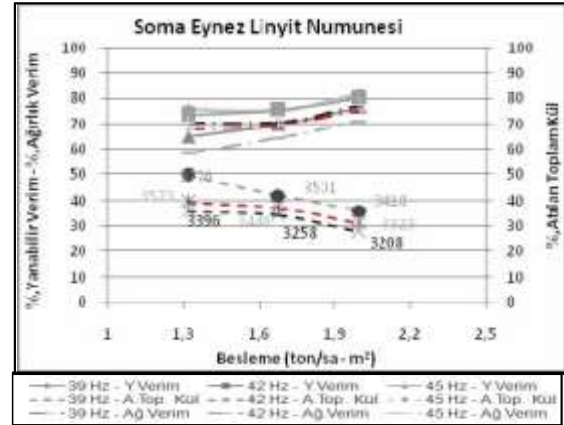
Şekil 16. Tabla eğimi-yanabilir verim, atılan toplam kül oranı ( 1,68 ton/saat- m<sup>2</sup> ).



Şekil 19. Tabla frekansı-yanabilir verim, toplam atılan kül oranı ( 1,68 ton/saat- m<sup>2</sup> ).



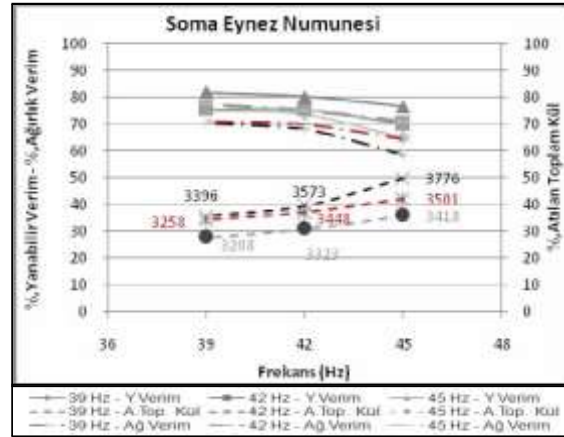
Şekil 20. Tabla frekansı - yanabilir verim, toplam atılan kül oranı (1,32 ton/saat - m<sup>2</sup>)



Şekil 21. Soma - Eynez linyit numunesi besleme hızının etkisi.

### 3.2. Soma-Eynez Numunesi Sonuçları

Yeniköy - Hisarönü linyit numunesine uygulanan koşullarının tamamlanmasının ardından elde edilen sonuçlara göre en başarılı sonuçların elde edildiği tabla eğimi 0,15 (8,5°) olarak belirlenmiştir. Bu nedenle, tabla eğimi parametresi 0,15 (8,5°) olarak sabitlenmiştir. Besleme hızı ve tabla frekansı parametrelerinin 3 farklı kademede denenmesi ile oluşturulan 9 deney koşulu Soma - Eynez linyit numuneleri üzerinde tekrar edilmiştir. Besleme hızının ve tabla frekansının etkisi Şekil 21 ve 22'de, elde edilen numunelerin analiz sonuçları ise Çizelge 7'de verilmektedir.



Şekil 22. Soma - Eynez linyit numunesi frekansın etkisi.

Çizelge 7. Soma-Eynez Numunesi Analiz Sonuçları

s. no	Alt Isıl Kal	% Mkon	%Kkül	%Akül	%Yan. Verim	% Top. At. Kül	Atık Kalori
1	3776	58,5	30,20	44,18	64,81	49,55	1241
2	3573	67,8	31,66	45,14	73,55	39,28	1156
3	3396	70,3	32,49	44,31	75,33	35,57	1258
4	3501	64,4	31,79	43,62	69,73	41,97	1298
5	3448	69,8	31,98	45,29	75,36	36,97	1054
6	3258	70,7	33,01	43,21	75,18	34,22	1125
7	3418	70,9	32,09	45,53	76,43	35,81	995
8	3323	75,1	32,77	45,74	80,14	30,78	845
9	3208	77,2	33,42	44,74	81,59	27,57	1015

Parametrelerin ayırım üzerindeki etkilerinin ortaya koyulabilmesi için çizilen grafikler incelendiğinde, her iki numunede de toplam atılan kül oranı ile yanabilir verim ve ağırlık verimi arasında zıt bir davranım olduğu açıkça görülmektedir. Ayırıcının çalışma koşulları, zenginleştirme işlemi sonucunda elde edilecek temiz kömürün kullanılacağı yakma ünitesinin gereksinimleri göz önüne alınarak ayarlanmalıdır.

### 4.PERFORMANS ANALİZİ

Deneylerde kullanılan Yeniköy-Hisarönü, Soma-Eynez linyit numuneleri ile yapılan deneyler sonucunda, iki numune için de deney koşulları 0,15 eğim, 45 Hz tabla frekansı ve 1,32

ton/saat-m<sup>2</sup> besleme hızı olarak sabit tutularak deneyler tekrar edilmiş elde edilen temiz kömür numunelerine yüzme - batma testi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlarla, iki deney numunesinin beslemesine ait yüzme-batma test sonuçları kullanılarak tromp eğrileri çizilmiştir. E<sub>p</sub> değerleri ve ayırım yoğunlukları (d<sub>50</sub>) hesaplanmıştır. Numunelere ait yüzme – batma test sonuçları sırasıyla Çizelgeler 8 ve 9'da tromp eğrileri ise Şekil 23 ve 24'de verilmektedir. E<sub>p</sub> değerleri Formül 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_p = \frac{(d_{25} - d_{75})}{2} \quad (1)$$

E<sub>p</sub> : Hata Faktörü

d<sub>25</sub> : %25 dağılım faktörüne gelen yoğunluk

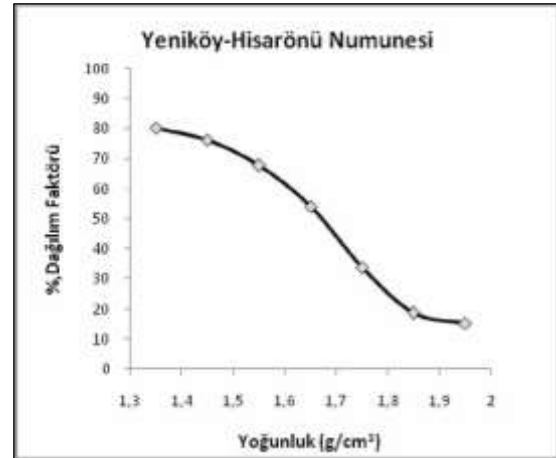
d<sub>75</sub> : %75 dağılım faktörüne gelen yoğunluk

d<sub>50</sub> : ayırım yoğunluğu' nu

ifade etmektedir.

Çizelge 8. Yeniköy-Hisarönü Numunesi Yüzme Batma Test Sonuçları

Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Ort. Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Temiz kömür		Besleme				Dağ. Faktör
		Miktar (%)	Kül (%)	Beslemeye Göre (%)	Miktar (%)	Kül (%)	Dağ. Faktör	
1,3	/	12,20	5,8	1,48	1,60	4,72	/	
1,3-1,4	1,35	39,32	11,2	24,11	26,66	7,90	84,12	
1,4-1,5	1,45	7,21	19,8	4,42	5,67	20,99	77,95	
1,5-1,6	1,55	3,31	27,2	2,03	3,07	28,97	66,12	
1,6-1,7	1,65	2,76	32,5	1,69	3,18	36,57	53,15	
1,7-1,8	1,75	1,53	47,4	0,94	2,48	52,02	37,90	
1,8-1,9	1,85	1,50	54,0	0,92	3,54	59,08	25,99	
1,9-2,0	1,95	1,97	62,0	1,21	6,50	62,19	18,62	
2	/	28,05	65,9	17,20	39,30	64,80	/	
<b>Top.</b>		<b>100</b>	<b>29,6</b>	<b>61,32</b>	<b>100</b>	<b>36,83</b>		

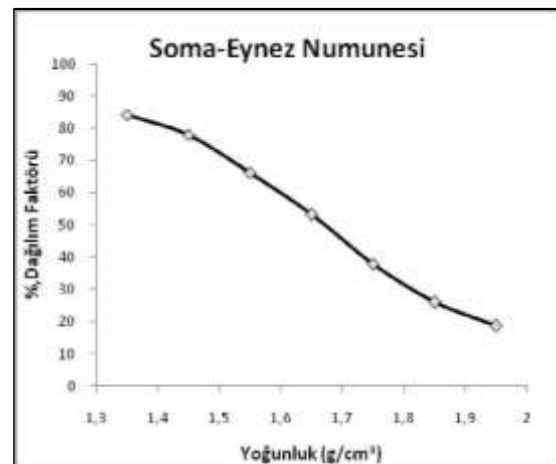


Şekil 23. Yeniköy-Hisarönü numunesi tromp eğrisi

Çizelge 9. Soma-Eynez Numunesi Elde Edilen Sonuçlar

Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Ort. Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )	Temiz kömür		Besleme				Dağ. Faktör
		Miktar (%)	Kül (%)	Beslemeye Göre (%)	Miktar (%)	Kül (%)	Dağ. Faktör	
1,3	/	2,64	21,4	1,48	1,82	21,9	/	
1,3-1,4	1,35	48,30	28,6	27,11	33,80	26,9	80,21	
1,4-1,5	1,45	23,13	29,9	12,98	17,03	29,4	76,22	
1,5-1,6	1,55	5,68	35,4	3,19	4,71	35,0	67,73	
1,6-1,7	1,65	1,38	49,9	0,77	1,43	49,6	54,07	
1,7-1,8	1,75	3,99	59,7	2,24	6,64	59,8	33,77	
1,8-1,9	1,85	0,69	60,1	0,39	2,09	60,4	18,66	
1,9-2,0	1,95	3,63	63,8	2,04	13,42	63,9	15,20	
2	/	10,28	68,9	5,77	19,06	68,9	/	
<b>Top.</b>		<b>100</b>	<b>36,2</b>	<b>56,13</b>	<b>100,0</b>	<b>43,8</b>		

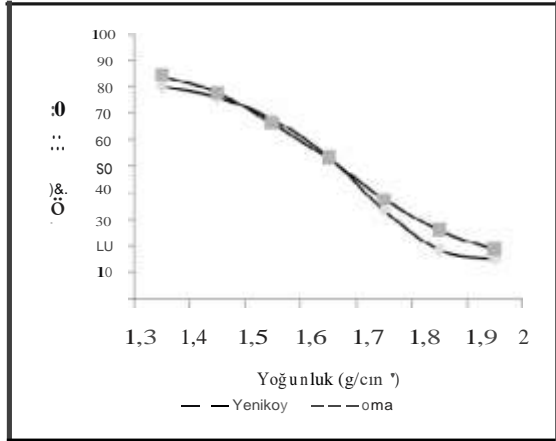
Yeniköy-Hisarönü linyit numunesi ile elde edilen E<sub>p</sub> değeri 0,165 ve ayırım yoğunluğu (d<sub>50</sub>) 1,67 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 24. Soma-Eynez numunesi tromp eğrisi

Soma-Eynez linyit numunesi ile elde edilen EP değeri 0,19 ve ayırım yoğunluğu ( $d_{50}$ ) 1,67 olarak gerçekleştirilmiştir.

iki farklı numune ile aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda Yeniköy-Hisarönü linyit numunesi ile elde edilen ayırımın Soma-Eynez linyit numunesi ile elde edilene göre daha yüksek performansla sahip olduğu Şekil 25'de görülmektedir.



Şekil25. Yeniköy-Hisarönü ve Soma-Eynez linyit numuneleri tromp eğrileri karşılaştırması

Yeniköy-Hisarönü linyit numunesi ile yapılan 27 adet deney sonucunda en yüksek kalari değeri 3391 Kkal/kg, 55,4 ağırlık verimi ve % 61,30 yanabilir verim oranları elde edilmiştir. Ancak genel olarak, 3000 Kkal/kg ile 3500 Kkal/kg alt ısı değerleri aralığında %72 ile %63 oranlarında yanabilir verim ve %70 ile %55 oranlarında ağırlık verimi elde edilebilmektedir. Ayrıca atık alt ısı kalari değerlerinin 1000 Kkal/kg 'nin altında kullanılamaz değerlerde olması önemlidir.

Soma - Eynez linyit numunesi ile yapılan deneylerde en yüksek kalari değeri 3776 Kkal/kg, ağırlık verimi % 58,5 ve yanabilir verim % 64,81 ile elde edilmiştir. Deneyler incelendiğinde 3200 Kkal/kg ile 3776 Kkal/kg alt ısı değerleri aralığında %81 ile %64 oranlarında yanabilir verim ve %77 ile %58 oranlarında ağırlık verimi elde edilebildiği görülmektedir. Besleme alt ısı kalari değerinin 2881 Kkal/kg olduğu göz önüne alındığında ayırım performansının çok yüksek olduğu söylenemez. Ancak, Soma- Eynez linyit numunesinin yıkanabilirlik eğrileri incelenerek kömür bünyesindeki külün düşük yoğunluklarda bile oldukça yüksek oranlarda bulunduğu göz

önüne alındığında elde edilen sonuçların önemli olduğu söylenebilir.

iki numune ile aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen EP ve  $d_{50}$  değerleri dikkate alındığında, yaş yöntemlere göre ayırım performanslarının düşük olduğu gözlenmektedir. Ancak, literatürdeki kuru kömür temizleme yöntemleri incelendiğinde havalı jigler için yaklaşık EP değerlerinin 0,25-0,3 arası olduğu, havalı masa ve FCM ve FGX gibi havalı ayıncılarda ise 0,15-0,25 arasında değiştiği görülmektedir.

## 5.SONUÇLAR

Yapılan ön deneyler sonucunda ayırım üzerinde etkisi olan değişkenler, tabla frekansı, tabla eğimi ve besleme hızı olarak tespit edilmiştir. İşlem değişkenleri incelendiğinde, besleme hızı ve eğimdeki artışın ayırım performansını kötü yönde etkilediği ve eğimin ayırım üzerinde besleme hızına göre daha fazla etkili olduğu tespit edilmiştir. Frekans artışı ise ayırımı olumlu yönde etkilemektedir.

iki numune ile aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen EP ve  $d_{50}$  değerleri dikkate alındığında, yaş yöntemlere göre ayırım performanslarının düşük olduğu gözlenmektedir. Ancak, havalı jigler, havalı masalar gibi kuru zenginleştirme yöntemleri dikkate alındığında ayırım performansının daha iyi olduğu ve daha düşük EP değerleri elde edildiği görülmektedir.

Ayıncının özellikle 40 mm' nin altında kömürün temizlenmesinde kullanılabileceği belirlenmiştir. ince boydaki ağır mineraller (yan taş) genellikle temiz ürüne kaçabilmektedir. iri boyda taşlar son derece başarılı olarak ayrılmaktadır.

Tabla türü havalı ayıncı deney düzeneği ile yapılan deneyler sonucunda, incetane boyundaki yan taşların temiz kömür ile karışmasına rağmen yakma ünitesinin ihtiyaçları doğrultusunda kullanılabileceği görülmüştür.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK Mühendislik Araştırma Grubu (MAG) tarafından "Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerinin Destekleme Programı" kapsamında desteklenmiştir.





## KAYNAKLAR

Alderman, J. K., 2001; "Improving Power Plant Performance and Reducing Emissions Through The Use of Pneumatic Dry Cleaning For Low Rank Coal", SME Annual Meeting, Feb. s:26-28, Denver, Colorado.

Arslan, V., Kemal, M., 2004; " Kömür Hazırlama ve Türkiye deki Uygulamalar", Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 217-227, Zonguldak.

Arslan, V., 2006; " Kuru Kömür Hazırlama Yöntemleri", Madencilik, **45(3)**, 9-18.

Chen, Q. and Yang, Y., 2003; "Development of Dry Benefication of Coal in China", Coal Preparation, **23**, 3 -12.

De Jong, T.P.R., Mesina, M.B. ve Kuilman, W.,2003; "Electromagnetic De-Shaling Of Coal", Physical Separation in Science and Engineering, **12(4)**, 223-236.

Donnelly, J., 1999; "Potential Revival of Dry Cleaning of Coal", The Australian Coal Review, October, 26-30.

Fan, M., Chen, Q., Zhao, Y., Luo, Z. And Guan, Y., 2003; "Fundamentals of Magnetically Stabilized Fluidized Bed for Coal Separation", Coal Preparation, **23**, 47-55.

Liu, Y.A. and Lin, C.J., 1976; "Assessment of Sulfur and Ash Removal from Coals by Magnetic Separation", IEEE Transactions on Magnetics, **MAG 12(5)**, 498-502.

Maoming, F., Qingru, C., Yuemin, Z., Zuenfu, L., Xinxi, Z., Xiuxiang, T., Guohua, Y., 2003; "Fine coal dry classification and separation", The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, **3(2)**, 196 -201.

Osborne, D.G., 1988; Coal Preparation Technology, Graham & Trotman Ltd.

Trigwell, S., Tennal, K. B., Mazumder, M. K. And Lindquist, D. A., 2003; "Precombustion Cleaning of Coal by Triboelectric Separation of Minerals" Particulate Science and Technology, **21**, 353-364.

Tüylüoğlu, Ş., Ofluoğlu, G., 2004; "Dünya

ve Türkiye'deki Kömür ve Kalkınma: Ekonomik Göstergelerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi", Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, 87-101.

Xu, S. and Guan, Y., 2003; "Numerical Simulation and Experimental Validation of Magnetic Medium Performance in Air-Dense Medium Fluidized Bed (ADMFB)", Coal Preparation, **23**, 57-65.

Zhenfu L., et al., 2008, "Density – dependent separation of dry fine coal in vibrated fluidized bed", Powder Technology, **187**, 119 -123.