

**MERMER ATIKLARININ KARIŞTIRMALI DEĞİRMEDE MİKRONİZE
ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hasan Ali TANER

**Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK
Temmuz 2012**

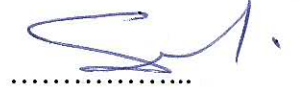
KABUL:

Hasan Ali TANER tarafından hazırlanan "MERMER ATIKLARININ KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE MİKRONİZE ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir. 20/07/2012

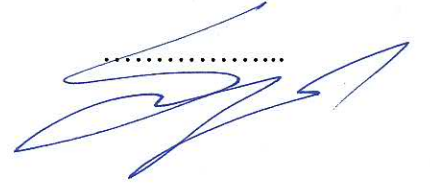
Başkan: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU (BEÜ)



Üye : Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ (İTÜ)



Üye : Prof. Dr. Sait KIZGUT (BEÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2012



Prof. Dr. Özden ÖZEL GÜVEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”



Hasan Ali TANER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MERMER ATIKLARININ KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE MİKRONİZE ÖĞÜTÜLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Hasan Ali TANER

Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

Temmuz 2012, 83 sayfa

Bu çalışmada, Marfam Mermer'in fabrikasından alınan parça mermer atıkları 1 mm'nin altına kırılmıştır ve laboratuvar ölçekli dikey pinli bir karıştırmalı değirmende kuru olarak öğütülmesi araştırılmıştır. Çalışma parametrelerinden; karıştırma hızı, doluluk oranı ve karıştırma süresinin, ürün inceliğine etkisi incelenmiştir. Tüm çalışma parametreleri için farklı deneyler yapılmıştır. Öğütücü ortam olarak 3,5-2,00 mm arası çapta zirkon bilyalar kullanılmıştır. Karıştırma hızının ve süresinin öğütmeye olan etkisi 5 farklı hızda (360, 540, 720, 1080 ve 1440 dev/dk) yapılan deneylerle belirlenmiştir. Doluluk oranının etkisinde 4 farklı doluluk oranlarında (%60, %80, %100 ve %140), değişik sürelerde deneyler yapılmıştır. Mikronize öğütülmüş mermer atıklarının boyut analizleri ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Mermer atıklarının endüstriye yeniden kazandırılması için, kullanım alanlarının standartlara uygunluğu araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Karıştırmalı değirmen, ince öğütme, mermer atıkları, bilya

Bilim Kodu : 607.02.02

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION TO FINE GRINDABILITY OF MARBLE WASTES IN A STIRRED MILL

Hasan Ali TANER

**Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mining Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

July 2012, 83 pages

In this study, waste marble pieces taken from Marfam Marble's factory were crushed below 1 mm and then dry grinding properties were investigated in a laboratory scale pin-type vertical stirred mill. Operating parameters such as stirring speed, filling rate and stirring time have a considerable effect on the fineness of the product were investigated. Different grinding experiments were carried out for all operating parameters. Zircon beads with diameters of 3,5-2,00 mm were used as the grinding media. The effect of stirring speed and stirring durations determined by grinding at different five speeds (360, 540, 720, 1080 and 1440 rotation per minute. Under the effect of filling rate of four different filling rates (%60, %80, %100 and %140), experiments were carried out in different times. Size analyzes and chemical properties of micronize milled marble wastes were determined. It was investigated to acceptability of the marble wastes area of usage in order to regain the marble wastes to industry.

Key Words : Stirred mill, fine grinding, marble wastes, bead

Science Code : 607.02.02

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımın yürütülmesinde, tezin bitimine kadar sağladığı tüm emeklerinden dolayı Sayın Hocam Prof. Dr. İhsan TOROĞLU'na (BEÜ) teşekkürü bir borç bilirim.

BEÜ Yakup Keskin Cevher Hazırlama Laboratuvarı olanaklarını kullanmamı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Sait KIZGUT'a (BEÜ) ve Doç. Dr. Dilek ÇUHADAROĞLU'na (BEÜ) teşekkür ederim.

Tez izleme jürisinde yer alan ve sağladığı önemli değerlendirme ve düzeltmeler ile çalışmamın sonuçlanmasında katkı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ'ye (İTÜ) teşekkür ederim.

Numunelerin alınmasında yardımcı olan Vedat MÜSEVİTOĞLU'na (MARFAM Madencilik) ve arkadaşarımdan Maden Mühendisi Hakan YILMAZ'a (TTK), Mehmet BAŞARAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans çalışmalarımda Zonguldak'a gidip gelmemde izin vererek yardımcı olan İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Mehmet ÖNAL'a (İÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Prof. Dr. Asım KÜNKÜL'e (İÜ) ve personellerine teşekkür ederim. İnönü Üniversitesi'nde laboratuvar çalışmaları sırasındaki katkılarından dolayı tüm Maden Mühendisliği Bölümü'ndeki değerli Hocalarıma ve arkadaşarıma teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvar çalışmaları sırasındaki katkılarından dolayı Uzm. Serdar YILMAZ'a (BEÜ), Arş. Gör. Barış AKKAYA'ya (BEÜ) ve Arş. Gör. Mehmet BİLEN'e (BEÜ) teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde büyük özveri gösteren aileme teşekkür ve minnettarlığımı sunarım. Her zaman bana destek olan eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 MERMER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	3
2.1 MERMERİN TANIMI	3
2.2 MERMERLERİN SINIFLANDIRILMASI	3
2.2.1 Mineral Tane Boyutuna Göre Sınıflandırma	3
2.2.2 Mineral Bileşim ve Oranlarına Göre Sınıflandırma	4
2.2.3 Yapı ve Dokularına Göre Sınıflandırma.....	4
2.2.4 Jeolojik Sınıflandırma.....	4
2.3 MERMER TÜRLERİ	4
2.3.1 Hakiki Mermerler	4
2.3.2 Kireçtaşları.....	5
2.3.3 Travertenler.....	5
2.3.4 Oniks Mermerler.....	6
2.3.5 Mermer Yerine Kullanılabilen Magmatik Kökenli Kayaçlar	6

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.4 MERMER ATIKLARI.....	6
2.4.1 Mermer Atıklarının Oluşumu	6
2.4.1.1 Ocaklarda Oluşan Atıklar.....	7
2.4.1.2 Fabrikalarda Oluşan Atıklar.....	8
2.4.2 Mermer Atıklarının Sınıflandırılması	10
2.4.2.1 Kapaklar	10
2.4.2.2 Molozlar	10
2.4.2.3 Paledyenler.....	10
2.4.2.4 Tozlar	10
2.4.3 Mermer Atıklarının Çevreye Olan Etkisi	10
2.4.3.1 Görüntü Kirliliği	11
2.4.3.2 Yeraltı ve Yerüstü Suyuna Etkisi.....	11
2.4.3.3 Bitki Örtüsü ve Toprak Üzerine Etkileri.....	12
2.4.3.4 Toz Oluşumu ve Hava Kirliliği.....	12
2.5 MERMER ATIKLARININ DEĞERLENDİRİLDİĞİ YERLER.....	13
2.5.1 Parça Mermer Atıkları	14
2.5.1.1 İnşaat Sanayi	14
2.5.1.2 Yol Yapımı.....	15
2.5.1.3 Demiryolu Zemin Malzemesi	16
2.5.2 Toz Mermer Atıkları.....	16
2.5.2.1 Çimento İmalat Sanayi.....	16
2.5.2.2 Seramik Sektörü.....	17
2.5.2.3 Plastik Sanayi.....	17
2.5.2.4 Kağıt Sanayi.....	19
2.5.2.5 Tarım ve Gübre Sanayi	21
2.5.2.6 Yem Sanayi.....	23
2.5.2.7 Boya Sanayi	23
2.5.2.8 Cam Sanayi	24
2.5.2.9 Kimya Sanayi.....	24
2.5.2.10Kozmetik Sanayi.....	25

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.5.3 Diğer Kullanım Alanları	25
BÖLÜM 3 BOYUT KÜÇÜLTME	27
3.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN ESASLARI	27
3.2 BOYUT KÜÇÜLTME KANUNLARI	29
3.2.1 Rittinger Kanunu	29
3.2.2 Kick Kanunu	30
3.2.3 Bond Kanunu	31
3.3 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK	33
3.3.1 Bond Öğütülebilirlik Deney Yöntemi	34
3.3.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deney Yöntemi	36
3.4 ÖĞÜTME	36
3.4.1 Çubuklu Değirmen.....	37
3.4.2 Bilyalı Değirmen	38
3.4.3 Otojen Değirmen	38
3.4.4 Yüksek Basınç Merdaneli Değirmen	39
3.4.5 Valsli Değirmen.....	40
3.4.6 Jet Değirmen.....	41
3.4.7 Titreşimli Değirmen.....	41
3.4.8 Yörüngesel Değirmen.....	42
3.4.9 Sarkaç Değirmen	43
3.4.10 Halkalı Değirmen.....	44
3.4.11 Çivili Değirmen	44
3.4.12 Karıştırmalı Değirmen	45
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
4.1 KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANITILMASI.....	51
4.1.1 İnceleme Alanının Konumu.....	51

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.1.2 Numunenin Kimyasal Özellikleri	53
4.2 KIRMA DENEYLERİ	53
4.3 ÖĞÜTME DENEYLERİ VE DENEYSEL SONUÇLAR	55
4.3.1 Karıştırmalı Değirmende Karıştırma Hızının Ürün Boyutuna Etkisi	59
4.3.2 Karıştırmalı Değirmende Öğütme Süresinin Ürün Boyutuna Etkisi	64
4.3.3 Karıştırmalı Değirmende Doluluk Oranının Ürün Boyutuna Etkisi.....	65
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ocaklarda oluşan atıklar	8
2.2 Paledyen atıklar.....	8
2.3 Çöktürme havuzu.....	9
3.1 Kırma makinelerinde mekanik zorlama tarzları	28
3.2 Boyut küçültmede tane boyutuna karşılık harcanan net enerji	33
3.3 Çubuklu değirmen.....	37
3.4 Konik bilyalı değirmen ve tüp tipi bir değirmen	38
3.5 Otojen değirmen	39
3.6 Yüksek basınçlı merdaneli değirmen.....	40
3.7 Valsli değirmen.....	40
3.8 Titreşimli değirmen ve kesit görünüşü	42
3.9 Boyut küçültmede tane boyutuna karşılık harcanan net enerji	43
3.10 Hikom değirmeninin çalışma prensibi ve kesit görüntüsü.....	43
3.11 Halkalı değirmenin görünüşü.....	44
3.12 Çeşitli çivili değirmen şekilleri.....	45
3.13 Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyu ile enerji tüketimi değişimi	46
3.14 Yatay bir karıştırmalı değirmenin şematik görünüşü	47
3.15 Karıştırmalı değirmende kullanılan karıştırma ünitesi şekilleri	47
4.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası	52
4.2 Ocak sahasının resmi	52
4.3 Merdaneli kırıcıdan çıkan numunenin elek altı eğrileri.....	55
4.4 Karıştırmalı değirmen	56
4.5 Karıştırmalı değirmenin şematik görünümü	56
4.6 Öğütücü zirkon bilyalar	57
4.7 Malvern Mastersizer 2000 cihazının görünüşü.....	58
4.8 360 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri	59
4.9 540 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.10 720 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri	60
4.11 1080 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri	61
4.12 1440 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri	61
4.13 Karıştırma hızı ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki.....	62
4.14 Öğütme süresinin tane boyut dağılımına etkisi.....	64
4.15 Öğütme süresi ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki.....	65
4.16 %60 doluluk oranındaki elek altı eğrileri	66
4.17 %80 doluluk oranındaki elek altı eğrileri	66
4.18 %100 doluluk oranındaki elek altı eğrileri	67
4.19 %140 doluluk oranındaki elek altı eğrileri	67
4.20 Doluluk oranları ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Mermer üretim aşamalarına göre oluşan atıklar	7
2.2 Türkiye’de 2011 yılında oluşan tahmini mermer atıkları miktarı.....	7
2.3 Türkiye’de kalsit tüketimi.....	13
2.4 Seka-Dalaman kağıt fabrikasında kullanılan CaCO ₃ ’ın özellikleri	21
4.1 Atık mermer numunelerinin kimyasal analiz sonuçları	53
4.2 Konik kırıcıdan çıkan numunenin elek analiz sonuçlar	54
4.3 Merdaneli kırıcıdan çıkan numunenin elek analiz sonuçları	54
4.4 Öğütücü ortamın fiziksel özellikleri	57
4.5 Değirmen gövdesini doluluk oranına göre besleme miktarları.....	58
4.6 Karıştırma hızı ve öğütme süresine bağlı olarak elde edilen ürünün ortalama tane boyutu.....	53
4.7 Doluluk oranı ve öğütme süresine bağlı olarak elde edilen ürünün ortalama tane boyutu.....	69

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

d	:	bilya çapı
dev	:	devir
dk	:	dakika
F	:	% 80'in geçtiği besleme boyutu
kg	:	kilogram
mm	:	milimetre
P	:	% 80'in geçtiği ürün boyutu
pH	:	alkalinite-asidite
sn	:	saniye
t	:	öğütme süresi
x	:	tane boyutu
W _i	:	iş indeksi
μ	:	mikron

KISALTMALAR

BEÜ	:	Bülent Ecevit Üniversitesi
BKO	:	boyut küçültme oranı
CA	:	kalsiyum alüminalı
CBR	:	Kaliforniya taşıma oranı
DPT	:	Devlet Planlama Teşkilatı
GCC	:	öğütülmüş doğal kalsiyum karbonat
İÜ	:	İnönü Üniversitesi
PCC	:	sentetik kalsiyum karbonat
ST	:	dairesel testereli taş kesme makinesi
TS	:	Türk standartları
TTK	:	Türkiye Taşkömürü Kurumu

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanoğlunun var oluşundan bu yana kullandığı en eski yapı malzemesi doğal taşlardır. Doğal taşlar, başta yapı malzemesi amaçlı olmak üzere çeşitli şekillerde kullanıla gelmiş ve bunun sonucu olarak da mermer sektörü önemli bir sanayi dalı halini almıştır. Madencilik sektöründe mermer sanayi önemli bir yer teşkil etmektedir. Ülkemizin her köşesinde mermer ocaklarına ve mermerlerin işlendiği mermer fabrikalarına rastlanmakta ve bu tesislerin sayıları gün geçtikçe artmaktadır. Mermer fabrikalarında üretilen ürünler iç ve dış pazara satılarak, ekonomimize ciddi miktarda döviz girdisi sağlanmaktadır.

1980'lerin başında 15 milyon dolar olan Türkiye'nin toplam mermer ihracatı 2011 yılında 1,7 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir. Ülkemizde 1980'li yıllardan sonra gelişmeye başlayan mermer sektörü, gelişmeyle beraber kimi sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunların da en önemlilerinden biri kuşkusuz mermer atıklarıdır.

Mermerlerin düzgün şekil alabilmesi için ocakta veya fabrikada kesilmesi sonunda mermer tozu ve molozlar ortaya çıkmaktadır. Kesim sonunda çıkan şlam boyutundaki parçacıklar ve molozlar depolanmakta ya da doğrudan araziye bırakılmaktadır. Dolayısıyla kontrolsüz olarak dökülen atıklar, çevre kirliliğine sebep olmaktadır.

Özellikle mermer fabrikalarının yoğunlaştığı bölgelerdeki mermer atıkları, kamuoyu gözünde çevre kirliliğine sebep olduğundan ve doğal güzelliğe zarar verdiği gerekçesiyle tepkilere neden olmaktadır. Bu atıkların kullanımı çevre kirliliğinin azalmasına katkıda bulunacaktır. Bu geri dönüşüm konusunda çalışmalar yapılmakta ve atıklardan yeni ürünler elde edilmesi veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır.

Yapılan araştırmalarda mermer atıklarının kalsitin yerine de kullanılabilceği grlmştir. Özellikle endüstride boya ve plastik sanayinde, kağıt sanayinde, inşaat sektöründe, cam ve kimya sanayinde kullanılmaktadır. Bu kullanım alanları için, ürünün ince hatta mikronize tane boyutunda olması istenmektedir; bundan dolayı öğütülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da öğütücü olarak, mikronize öğütme yapabilen karıştırmalı değirmen kullanılmıştır.

Karıştırmalı değirmenler kolay işletim koşulları, basit yapılı, yüksek boyut küçültme oranları, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi ve düşük enerji sarfiyatı yanında, dar boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında son yıllarda yoğun olarak tercih edilmektedir (Wang and Forssberg 2000).

Bu alışmada, Marfam Mermer'in fabrikasından alınan moloz mermer atıkları 1 mm'nin altına kırılmıştır ve sonra laboratuvar ölçekli dikey pinli bir karıştırmalı değirmende kuru olarak mikronize öğütülmesi araştırılmıştır. Çalışma parametrelerinden; karıştırma hızı, doluluk oranı ve karıştırma süresinin, ürün inceliğine etkisi incelenmiştir. Öğütme performansları karışılaştırılmış ve bazı parametrelerin ürün inceliği üzerine etkileri araştırılmıştır. Tüm alışma parametreleri için farklı deneyler yapılmıştır. Öğütücü ortam olarak 3,5-2,00 mm çapta zirkon bilyalar kullanılmıştır. Karıştırma hızının etkisi, 5 farklı hızda (360, 540, 720, 1080 ve 1440 dev/dk) ve farklı sürelerde öğütme yapılarak belirlenmiştir. Doluluk oranının etkisinde 4 farklı doluluk oranlarında (%60, %80, %100 ve %140), değişik sürelerde deneyler yapılmıştır.

BÖLÜM 2

MERMER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 MERMERİN TANIMI

Bilimsel anlamda mermerler kalker (CaCO_3) ve dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) gibi karbonat bileşimli kayaçların ısı ve basınç altında metamorfizmaya uğrayarak, tekrar kristalleşmesi sonrasında yeni bir yapı kazanmalarıyla meydana gelen kayaçlardır (Onargan vd. 1992).

Blok verebilen, kesilip parlatılabilen ya da yüzeyi işlenebilen ve malzeme özellikleri kaplama taşı normlarına uygun olan her türden taş (tortul, magmatik ve metamorfik) ticari dilde mermer olarak bilinmektedir (Şentürk vd. 1996). Bu tanım uyarınca kalker, traverten, kumtaşı gibi tortul; gnays, mermer, kuvarsit gibi metamorfik; granit, siyenit, serpantin, andezit, bazalt gibi magmatik kayaçlar da mermer olarak isimlendirilmektedir.

2.2 MERMERLERİN SINIFLANDIRILMASI

Mermerler, oluşum esnasındaki şartlara bağlı olarak farklı mineralojik, kimyasal ve yapısal özelliklere sahip olmaktadır. Buna bağlı olarak, mermerler aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır.

2.2.1 Mineral Tane Boyutuna Göre Sınıflandırma

Gerçek mermerler kalsit veya dolomitik kalsit kristallerinin boyutlarına göre:

Çok ince kristalli (50 mikrondan küçük),

İnce kristalli (50-100 mikron arası),

Orta kristalli (100-1000 mikron arası),

Kaba kristalli (1000 mikrondan büyük) olmak üzere dört sınıfa ayrılırlar.

2.2.2 Mineral Bileşim ve Oranlarına Göre Sınıflandırma

- Mermer; %95 kalsit (CaCO_3) içerir. Masif yapıda ve taneli dokuya sahiptir. Kuvars ve mika gibi diğer mineralleri içerebilir.
- Kalkşist; %60-70 kalsit içerir. Şisti yapıda ve yönlü dokuya sahiptir. Klorit, epidot, mika ve lepidolit gibi diğer mineralleri içerebilir.
- Spolen; %80 kalsit içerir. Şisti yapıda ve yönlü dokuya sahiptir. Flogopit, tremolit, diopsit, plajioklas ve grona gibi diğer mineralleri içerebilir.
- Mermer-Skarn; %80-90 kalsit içerir. Masif yapıda ve taneli dokuya sahiptir. Epidot, diopsit, grona, olivin ve plajioklas gibi diğer mineralleri içerebilir (Köktürk 2002).

2.2.3 Yapı ve Dokularına Göre Sınıflandırma

- Masif mermer; kompakt görünümlü, ince ve iri tanelidir.
- Laminal mermer; renkli şeritli görünümde, ince taneli şeritler farklı ve mineral veya elementler içerirler.
- Şisti mermer; yapraklı yapıda ve önemli miktarda mika içermektedir.
- Breşik mermer; tekrar kırılmış ikincil minerallerle dolgulanmıştır. Ana dolgular farklı renk ve mineral içerikli olabilirler (Köktürk 2002).

2.2.4 Jeolojik Sınıflandırma

- Magmatik kayalar (granit, diyabaz, siyenit vb.)
- Metamorfik kayalar (hakiki mermerler vb.)
- Sedimanter kayalar (travertenler, oniks mermerler, kireçtaşları vb.) (Onargan vd. 1992).

2.3 MERMER TÜRLERİ

2.3.1 Hakiki Mermerler

Metamorfizma olayı sonucunda kalker ve dolomitik kalkerlerin yeniden kristalleşmesiyle meydana gelmiş mermerlerdir. %95 civarında kalsiyum karbonat bileşimini oluşturmaktadır. Düşük oranda MgCO_3 içermektedir.

Yapılarında az miktarda silis, silika, feldspat, demir oksit, mika, fluorit ve organik maddeler bulunabilir. Renkleri genelde beyaz ve grimsidir. Fakat yabancı maddeler nedeniyle sarı, pembe, kırmızı, mavimsi, esmerimsi ve siyah gibi renklerde de olabilirler. Mikroskop altında incelendiğinde, birbirine iyice kenetlenmiş kalsit kristallerinden oluştuğu görülür (Onargan vd. 1992).

2.3.2 Kireçtaşları (Kristalize Kalkerler)

Kalker çok yaygın olarak kullanılan, çok geniş alanlarda teşekkül etmiş olan, önemli bir tortul kayadır. Bileşim olarak kalsiyum karbonattır (CaCO_3). Sertlik cetvelindeki yeri 3; yoğunluğu $2,7 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Bu özellikleri itibariyle, kimyasal değişmeye, kırılmaya ve yontulmaya çok elverişlidir. Kireçtaşları çok saf olduklarından bileşimlerinde %56 CaO, %44 CO_2 bulunur. Yapılarında %10'dan fazla MgCO_3 bulunan kalkerlere dolomitik kalker denir. Bu miktar %45 olursa dolomit adını da almaktadır. Bileşimleri kireçli ve dolomitli organik atıkların kimyasal çökmesi esasına göre oluşan bu tip kalkerler tektonik hareketler neticesinde kristalleşirler (Onargan vd. 1992).

2.3.3 Travertenler

Travertenler sıcak su kaynağının kireçtaşını çözündürmesi ve çözünen materyalleri bünyesine alarak, çatlak ve kırık hatlar boyunca uygun şartlar geliştikçe çökelmeleri sonucunda oluşmaktadır. Oluşum ortamında magma suyunun sıcaklığı çok fazla ve kalsiyum bikarbonat oranı çok yüksek ise, o takdirde çökme hızla meydana gelmektedir. Bu şekil bir oluşuma traverten çökmesi denir. Meydana gelen çökelek oldukça yoğun ise çökelek arasında kalan irili ufaklı boşluklar oluşmasına neden olmaktadır.

Çökelek fazla gazlı bir ortamda meydana geliyor ve çok çabuk birikmeler teşkil ediyor ise; oluşan çökelek fazla delikli ve sünger taşına benzer bir bünye gösterir. Bu cins travertenlere kalker tüfü denir ve en görünür özelliği çok yüksek derecede gözenekli olmasıdır (Önem 2000).

2.3.4 Oniks Mermerler

Magma suyunun sıcaklığı oldukça düşük ve az olması ve daha fazla madeni tuzlar içermesi çökelmenin daha yavaş bir şekilde oluşmasına neden olmaktadır. Bu şartlarda meydana gelen kayaç kristalize, yoğun ve oldukça saydamdır. Bu kayaçlara oniks mermeri (su mermeri) denir. Bunlar genellikle beyaz, kırmızı, sarı, yeşil renkte olup, yarı saydamdırlar. Işık 1 – 3,5 cm derinliğine geçebilir. Bazı tuzların etkisiyle renkli olurlar. Tek renk olduğu gibi değişik renkler gösteren bant tabakası, damarlar vb. halinde de bulunabilirler.

Oniks mermerleri, kristaller birbirine sıkı şekilde bağlılığından dolayı oldukça serttir. İçine karışan silikatlar sertliğini artırır. Yoğunluğu 2,2 - 2,3 gr/cm³ arasındadır. Çok iyi parlatılırlar (Onargan vd. 1992).

2.3.5 Mermer Yerine Kullanılabilen Magmatik Kökenli Kayaçlar

Mermer türlerinden sonuncusu ise mermer yerine kullanılabilen magmatik kökenli kayaçlardır. Türkiye’de yeni bir konu olarak gelişen sert taşlar ülkemizin çeşitli yerlerine dağılmış halde bulunmaktadır. Sert kayaçlar kapsamı içerisinde granitler, diyabazlar, siyenitler, serpantinler vs. girmektedir (Onargan vd. 1992).

2.4 MERMER ATIKLARI

2.4.1 Mermer Atıklarının Oluşumu

Blokların veya kesilebilir boyuttaki molozların ocaklardan çıkarılması esnasında oluşan irili ufaklı parçaların yanı sıra; blokların mermer işleme tesislerin mamul hale getirilmesi esnasında oluşan bütün mermer plaka parçaları ve tozları mermer atığı olarak adlandırılmaktadır.

Mermer üretim aşamalarına göre oluşan atık miktarları Çizelge 2.1’de gösterilmiştir. Türkiye’de mermerin blok ve işlenmiş taş üretiminde oluşan atıkların tahmini 2011 üretim verileri ise Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Mermer üretim aşamalarına göre oluşan atıklar.

Kayıplar	Net Mermer Üretimi	Mermer Ocak Atığı	Mermer İşleme Atığı	Silim-Parlatma Atığı	Toplam Atık	Üretilmiş Mermer Rezervi
%	30	50	15	5	70	100

Çizelge 2.2 Türkiye’de 2011 yılında oluşan tahmini mermer atıkları miktarı.

Ocak atıkları	15 milyon ton/yıl
Toz atıklar	4,5 milyon ton/yıl
Kesilmiş veya kırılmış parça atıklar	4,5 milyon ton/yıl
Toplam	24 milyon ton/yıl

2.4.1.1 Ocaklarda Oluşan Atıklar

Ocakta ana kütlede koparılan ve çok iri boyutlarda olan blokların sayılanması (belirli ebatlarda blok elde edilmesi için alt, üst ve yanlardan kesilmesi) esnasında kapak adı verilen parçalar ortaya çıkmaktadır (Şekil 2.1).

Ayrıca, mermer ocağında bulunan arızalar, faylar ve benzeri nedenlerden dolayı, blok üretimi yapılırken ortaya çıkan ve blok elde edilemeyen iri boyuttaki molozlar açığa çıkmaktadır. Bunlara ocak pasası denilmektedir. Mermer ocaklarında oluşan bu atıklar ocakların kenarlarında biriktirilerek kendi haline terk edilmekte veya endüstride kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 Ocaklarda oluşan atıklar (kapaklar).

2.4.1.2 Fabrikalarda Oluşan Atıklar

Fabrikalarda bloklardan belirli ebatlarda plakalar elde edilmektedir. Başlangıçta bu plakaların boyutları uygun ölçülerde olmadığından, ebatlama esnasında kenarlarından parçalar açığa çıkmaktadır. Bununla birlikte blok ve plakalarda bulunan çatlak veya kırıklardan dolayı plakalar kırılmakta ve böylece küçük boyutlarda parça plaka atıklar oluşmaktadır. Mermercilikte bunlara paledyen (Şekil 2.2) adı verilmektedir.



Şekil 2.2 Paledyen atıklar.

Elmas soketli, dairesel testereli taş kesme makinelerinde (ST); bloklardan plaka elde edilmesi esnasında, blokların alt kısımlarından açığa çıkan ve plaka mermer elde edilmesi mümkün olmayan iri boyuttaki mermer atıkları oluşmaktadır. Bunlardan zaman zaman mutfak taşı evyesi elde edilmektedir.

Mermerciler için en önemli sorunlardan birisi; mermerin kesilmesi esnasında makinelerin kesme işlemini yapan testerelerin ağzından çıkan çok küçük boyuttaki mermer tozu atıkların oluşumudur. Kesme işlemi sulu olarak yapıldığından, açığa çıkan tozlar su ile birlikte taşınmakta ve çökeltme havuzlarında toplanmakta (Şekil 2.3), ya da yeni yöntem uygulanan çökeltme tanklarında susuzlaştırılıp presleme makinelerinde sıkıştırılarak kek haline getirilmektedir. Her iki halde de açığa çıkan atıklar presleme makinelerinde sıkıştırılarak kek haline getirilmektedir ve doğaya atılmaktadır.



Şekil 2.3 Çöktürme havuzu.

2.4.2 Mermer Atıklarının Sınıflandırılması

2.4.2.1 Kapaklar

Kapaklar; ocaklarda büyük boyutlardaki blokların sayılanması esnasında alt, üst ve yan yüzeylerden açığa çıkan, fabrikalarda bloktan plaka mermer elde edilmesi esnasında bloğun alt kısmından açığa çıkan ve çoğu zaman bir tek düzgün yüzeye sahip olan iri boyuttaki mermer parçalarıdır.

2.4.2.2 Molozlar

Ocaklarda mermerin yapısından kaynaklanan arızalar (kırık, çatlak, fay vs.) nedeniyle blok üretimi esnasında ortaya çıkan şekilsiz ve iri boyuttaki mermer parçalarıdır.

2.4.2.3 Paledyenler

Plaka mermerden ebatlı mamul elde edilirken, plakaların kenarlarından kesilip atılan ve başka ebatlı bir ürün elde edilemeyen plaka parçası mermerlerdir.

2.4.2.4 Tozlar

Fabrikada mermerin makinelerde kesilip islenmesi esnasında açığa çıkan ve çoğunluğu 1 mm'nin altında olup çoğunluğu 150 µ'un altında boyuta sahip olan mermer tanecikleridir.

2.4.3 Mermer Atıklarının Çevreye Olan Etkisi

Mermer ocağı işletmelerinin yeryüzünün genel yapısı, bitki örtüsü, hava, yeraltı ve yerüstü suları gibi çevre elemanlarına olumsuz yönde etkisi bulunmaktadır. Mermer ocağı işletmelerinin çevreye olan zararları sorunun bilinmesi, zararlı etkilerin derecesi, bunlardan korunması ve giderilmesi kriterleri göz önüne alındığında diğer endüstrilere göre daha az zararlı olup sadece görsel etki yönünden dezavantajlı olduğu görülmektedir. Çünkü mermer atıklarının çevrede kalıcı bir etkisi bilinmemekte olup diğer kirletici unsurların da alınacak önlemlerle azaltılması veya tamamen bertaraf edilmesi mümkündür.

2.4.3.1 Görüntü Kirliliği

Mermer ocak işletmelerinin ve açık ocak madenciliğinin yeryüzünün genel yapısı, bitki örtüsü, hava, yeraltı ve yerüstü suları, gürültü, toz gibi çevre elemanları üzerinde etkisinin olduğu tartışılmaz bir gerçektir. Bu etkiler üzerindeki en büyük problem görsel etki olup diğer sorunların da göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Çünkü görsel etki, aynı zamanda diğer sorunların bir aynasıdır. Ancak bu etkiler iyi bilinmekte olup kısa veya uzun vadede kabul edilebilecek sınırlara indirgenebilecek özelliktedir (Çelik vd. 2003).

Ocak işletilme süresinde doğal çevrede meydana gelen değişimler bariz bir şekilde izlenebilmektedir. Mermer ocak işletmelerinde çevresel etkinin en bariz örnekleri, yeryüzü görünümünün bozulması ve buna bağlı olarak oluşan görsel etkidir.

Yeryüzü görünümünü bozan çalışmalar; dekapaj ve üretim faaliyetleri sonucunda oluşan çukurluklar ile ocakta oluşan mermer atıklarının ve mermer işleme kesme fabrikalarında oluşan mermer atıklarının döküldüğü döküm sahalarıdır.

2.4.3.2 Yeraltı ve Yerüstü Suyuna Etkisi

Bilindiği üzere uluslararası uygulamalarda standart su kalitesi, ölçülebilen 3 parametre ile ifade edilmektedir. Bunlar sırasıyla suyun pH'ı, toplam askıdaki katı madde miktarı ve biyolojik oksijen gereksinimi değerleridir. Mermer ocak işletmeciliği ve işleme tesislerinde ortaya çıkan yüzey suları için izin verilen emisyon değerleri TSS için 20-100 mg/litre, BOD için 40-125 mg/litre ve pH için de 5 ile 11 değerindedir (Onargan 2007).

Mermer madenciliği işlemlerinde gerek mermer ocağı işletmeciliği gerekse işleme tesislerinde ortaya çıkan atık sularında organik kökenli bir kirliliğe neden olacak oluşumlar meydana gelmemektedir. Mermer ocak işletmeciliğinde ana damardan mermer blok kesiminde ve blok sayalamada ve de sulu delik delme aşamalarında suda askıdaki katı madde miktarı artışı meydana gelmektedir. Bu da yer altı ve yerüstü sularına olumsuz etki etmektedir.

Mermer işleme tesislerinde ise askıda madde miktarı işletmelerdeki atık tesislerinde çöktürme ve filtreleme sonucu katı kek atık haline getirilmekte ve elde edilen katı kek halindeki atıklar seramik fabrikaları, kâğıt fabrikaları ve diğer sanayilerde hammadde olarak kullanılabilir. Arıtılan su tekrar işletmede kullanılmaktadır (Onargan 2007).

2.4.3.3 Bitki Örtüsü ve Toprak Üzerine Etkileri

Bitki örtüsüne ve toprak üzerine tozlar zarar vermektedir. Mermerin ocaktan çıkarılmasında ve işlenmesinde herhangi bir toksit ve asidik madde kullanımı yoktur. Toz problemi de; ocak yollarında gerekli düzenlemelerin yapılması ve sık sık sulanması ile ortadan kalkmaktadır. Ancak işletmelerin bu basit önlemleri çoğu zaman ihmal ettikleri ifade edilmektedir (Tur 2007).

2.4.3.4 Toz Oluşumu ve Hava Kirliliği

Mermer ocak işletmeciliğinde ve işleme tesislerinde blok kesme ve işleme makineleri, kollu kesiciler, ST, katarak gibi makineler genelde sulu kesim yaptıklarından kesim anında toz açığa çıkması söz konusu değildir. Ancak mermer ocak işletmeciliğinde özellikle basınçlı hava ile delik delme işlemlerinde, traverten ve kireçtaşı türü formasyonlarda kullanılan Jet-belt ve zincirli kollu kesicilerin kuru kesim yapması durumunda toz emisyonu ortaya çıkmaktadır.

Ocak içi nakliye yollarında da zaman zaman toz emisyonu olabilmektedir. Bu tozlar çalışanları, çevre yerleşim birimlerini, bitki örtüsünü olumsuz etkileyebilmektedir. Tozluluk ister doğal, ister yapay nedenlerden kaynaklansın, görüş mesafesini azaltan, güneş ışınlarının adsorblandığı bandı değiştiren, insan, hayvan ve bitki sağlığına olumsuz etki yapan bir kirlilik türüdür.

Önlem alınmaması durumunda mermer ocak üretimleri sonucu oluşan tozlanmalarda çevre yerleşim alanlarının yanı sıra, fundalık ve makilik hatta orman alanlarının da etkilenmesi mümkün olabilmektedir. İşletme içi nakliye yollarında devamlı sulama yapılarak, nemli kalması sağlanmalı ve tozlu kesimlerde makineler ile kesme işlemi sırasında gerekli sulama ile tozlanma en aza indirgenmelidir (Onargan 2007).

2.5 MERMER ATIKLARININ DEĞERLENDİRİLDİĞİ YERLER

Yapılan araştırmalarda mermer atıkları hem parça olarak hem de mikronize öğütölmüş toz olarak birçok endüstride kullanıldığı görölmüşür. Bu bölümde de kullanıldığı endüstrilerden bahsedilecektir. Özellikle mermer toz atıkları kalsitin yerine kullanılmaktadır.

Kalsit ölkemizde zengin rezerve sahip bir endüstriyel mineraldir. Boya, kağıt, dolgu, gübre, plastik, vb. birçok sektörde beyazlık, aşındırıcılık ve aşınmaya karşı direnç kazandırma özellikleri nedeniyle mümkün olduğu kadar fazla kullanılan bir dolgu maddesidir. Temel birçok sanayinin ana girdisi olmakta, titanyum dioksit gibi çok pahalı pigmentlerin daha az kullanılmasını sağladığı için, gerek ekonomik gerekse çevre sağlığı açısından kullanımı yaygın bir maddedir. Türkiye’de kalsit tüketimi Çizelge 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Türkiye’de kalsit tüketimi (2007).

Tüketim Sektörü	Tüketim Miktarı (ton/yıl)
Kağıt Sektörü	50000
Boya Sektörü	80000
Plastik, Kablo Sektörü	65000
İnşaat Sektörü	30000
Yapıştırıcılar Sektörü	5000
Gıda Sektörü	10000
Seramik Sektörü	20000
Halı, Muşamba Sektörü	20000
Toplam	300000

Cevher olarak ocaktaki değeri 3-5 \$/t olan kalsit öğütölüp torbalandıktan sonra 40-200 \$/t değerlere ulaşmaktadır. Ton başına katkı payı çimentodan daha yüksektir.

2.5.1 Parça Mermer Atıkları

2.5.1.1 İnşaat Sanayi

İnşaat alanında; mozaik, yapıtaşı, çimento, harç ve sıva olarak kullanıldığı gibi, kireç elde edilen en önemli hammaddelerden birisidir. “Sunı Mermer” olarak da bilinen yer karolarının imalatında ana hammadde olarak doğal mermerler kullanılmaktadır. Uygun boyutlardaki mermer parçalarının bağlayıcılar ile beraber, mermer agregalı karo üretiminin temelini oluşturmaktadır. Mermer parçalarının yanı sıra % 10–12 oranında, boyutu 0,5 mm altında olan mermer tozu da kullanılmaktadır. Karo imalatçıları; kullandıkları mermer parçalarını ve mermer tozunu hazır olarak diğer imalatçılardan aldığı gibi bazılarında kendi özel ocaklarında delme patlatma metoduyla mermer tozları üreterek kendi kırma ve öğütme tesislerinde boyut küçültme işlemine tabi tutulmaktadır (Bilensoy 2010).

Mermer toz atıklarının derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla yapılan çalışmada bu atıklarda bulunması gereken özellikler olan, tane boyut dağılımı, kimyasal bileşiminin uygunluğu (yüksek CaCO_3 oranı), beyazlık (yabancı madde içermeme) ve nem oranı değerlendirilmiştir. Çıkan sonuçlara göre mermer fabrikası toz atıkları, kurutma, zenginleştirme, öğütme ve boyuta göre sınıflandırma işlemlerini takiben bu sektörde kullanım alanı bulabilir (Ceylan vd. 2001).

Mermer atıklarının beton üretiminde kullanılmasına dair yapılan araştırmada, mermer tozlarının beton karışımında kullanılmasıyla beton kalitesinde olumsuz bir etki oluşturmadığı görülmüştür. Üretilen mermer tozu katkılı beton numuneler üzerinde basınç, ultra ses hızı ve su emme deneyleri yapılmıştır. Sonuçlar normal beton değerleriyle karşılaştırılarak, elde edilen sonuçlara göre mermer tozunun belirli oranlarda karışıma katılması beton özelliklerine olumlu bir etki yapabileceği gözlenmiştir (Ünal vd. 2001).

Alyamaç ve İnce (2008) tarafından yapılan başka bir çalışmada, mermer tozu içeren kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) taze ve sertleşmiş beton özellikleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda mermer tozunun çevresel bir atık olarak, her hangi bir öğütmeye tabi tutulmadan doğal haliyle KYB üretiminde kullanılmasının birçok yönden fayda sağladığı görülmüştür.

İnşaat sektöründe;

- Sıva harcı karışımında,
- Dolgu malzemesi olarak,
- Mozaik üretiminde,
- Kaplama ve döşeme,
- Kireç üretiminde,
- Mıdır olarak,
- Paledyen olarak ve
- Kara ve demir yollarında, kullanım alanları bulunmaktadır.

2.5.1.2 Yol Yapımı

Türkiye’de doğal taş işleyen endüstrilerden yaklaşık olarak yılda 2,7 milyon ton atık çamur ortaya çıkmakta ve bu atıklar boş arazilere veya vadilere boşaltılmaktadır. Mermer atıkları stabilizasyon malzemesi olarak yollarda kullanılabilir. Yol zeminindeki kil mineralleri ile birleşerek plastisite, genleşme ve kabarma katsayılarına etki eder. Ayrıca mıdır olarak da yol yapımında kullanılır.

Yapılan çalışmada (Yıldız vd. 2006), mermer atık çamurunun zemin stabilizasyon malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için yol inşaatında teknik açıdan uygulanabilirliği incelenmiştir. Analiz için toprak numuneleri, Antalya, Burdur, Isparta ve Afyon il sınırları içerisinde bulunan yol güzergâhından ve atık çamur örnekleri, aynı bölgedeki mermer işletmelerinden toplanmıştır. Deney numuneleri, toprak örnekleri içerisinde % 0 ile 40 arasında değişen oranlarda doğal taş toz atıklarının çamur halinde ilavesi ile hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler için elek analizi, özgül ağırlık, Atterberg limitleri, standart proktor, kesme kutusu ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testleri uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarında; endüstride uygulanan işlemler nedeniyle kısmi kireç özelliği gösteren atıkların, yol zemini inşaatında kullanılan toprak malzemeleri önemli derecede iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

2.5.1.3 Demiryolu Zemin Malzemesi

Demiryoluna sağlam bir zemin oluşturmak için öncelikle zemine balast denilen yeterli sağlamlıkta ve boyutlandırılmış granül taş döşenir. Böylece demiryolu üzerindeki yükler rahat bir şekilde karşılanırken, demiryolları yapım malzemeleri olan travers ve raylar suyun etkisinden korunmuş olur. Mermer parçaları da balast yerine kullanılabilen özelliğe sahiptir.

2.5.2 Toz Mermer Atıkları

2.5.2.1 Çimento İmalat Sanayi

Çimento; CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve MgO ihtiva eder, esas itibariyle kalker ve kil karışımı olan, klinkerleşme sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonra, gerektiğinde alçı, vb. katkı maddeleri karıştırılıp öğütülerek toz halinde elde edilen bir malzemedir. En önemli özelliği % 11-15 miktarında su ile karıştırıldığı zaman belli bir süre sonra sertleşerek karışımdaki diğer malzemelerin birbirine bağlanmasını sağlar. Çimento sanayinde her ne kadar çok miktarda CaCO₃ bileşimli hammaddeler kullanılırsa da, mermer sadece beyaz Portland çimentosu yapımında kullanılmaktadır. Normal Portland çimentosu bileşimindeki kalker yerine hammadde olarak mermer, kil yerine de kaolen kullanılmasıyla beyaz Portland çimentosu elde edilmiş olur (Çelik 1996).

Yapılan bir çalışmada Afyon bölgesi mermer atıklarının Portland kompoze çimentosu üretiminde katkı maddesi olarak kullanım olanakları araştırılmıştır. TS 12140 standardında Portland Kalkerli Çimento ile ilgili değerler;

CaCO₃ % 75

2 günlük basma dayanım değeri > 10 N/mm²

28 günlük basma dayanım değeri > 32,5 N/mm² olarak verilmiştir.

Kavas vd. (2003), Afyon bölgesi mermer atıklarının kalsiyum alüminalı (CA; CaO-Al₂O₃) çimento üretiminde bir hammadde olarak kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada, Afyon bölgesinde üretim yapan farklı mermer işleme tesislerinin toz atıklarının aynı miktarda katılımıyla oluşturulan numunelerden farklı oranlarda kullanılarak üç değişik reçete hazırlanmıştır. Bu reçetelerden üretilen üç farklı kalitede (düşük, orta ve yüksek) Kalsiyum Alüminalı (CA) çimento üzerinde standart çimento deneyleri olan kimyasal analiz, yoğunluk, incelik (Blaine), priz başı ve sonu ile 6 ve 12 saat sonrası basma dayanımı gibi deneylerin yanı sıra XRD, DTA ve SEM analizleri yapılmıştır. Sonuçlar uluslararası refrakter çimento piyasasında önemli bir paya sahip SECAR firması tarafından piyasaya sunulan aynı sınıf CA çimentosu (Fondu, Secar 51 ve Secar70) katalog değerleriyle karşılaştırılmış ve karşılaştırma sonrasında atıklar kullanılarak üretilen CA çimentolarının SECAR firması tarafından piyasaya sunulan CA çimentosu değerlerini kazandığı gözlemlenmiştir.

2.5.2.2 Seramik Sektörü

Seramik üretiminde %5–6 oranında mermer kullanılmaktadır. Seramik bünye ve sırlarında CaO olarak bünyeye alınan hammadde kaynakları genel olarak kalsit, dolomit ve mermerdir. Karışık ve kalsitli akçini çamurlarının mineralojik biçiminde %5–20 arasında CaCO₃ kullanılır. Bu CaCO₃ çok ince öğütülmüş mermer halinde bileşime katılır. İri taneli ve iyi dağılmamış kalsit çamur içinde hatalara yol açar. Özsüz seramik hammaddesi olan kalsit türleri, seramik çamurlarında artan sıcaklık ile birlikte gözenekliliği azaltır. CaO sırdaki SiO₂ ile reaksiyona girerek bir ara tabaka oluşturur. Bu ara tabaka seramik teknolojisinde çok önemlidir. CaO sır içindeki diğer oksitlerle birleşerek cam oluşumuna yardımcı olur (Çelik 1996).

2.5.2.3 Plastik Sanayi

Dünyada plastik ihtiyacının artması sonucu, üreticiler, kaliteyi düşürmeden maliyeti azaltmak için 1970'li yıllardan itibaren mineralleri dolgu malzemesi olarak kullanmaya başladılar. Bu minerallerden biri de CaCO₃'dür. Ancak inorganik malzeme olan minerallerle organik malzeme olan polimerlerin bir arada kullanımı yüzey gerilim farklarından ötürü bazı sorunlar oluşturmuştur. Bu sorunları önlemek için mineralleri kaplama yoluna gidilmiştir.

Bugün yaklaşık 100 çeşit yüzey kaplama yöntemi vardır. CaCO_3 için yüzey kaplaması, yaygın olarak stearik asit ile yapılmaktadır. Kaplanmış CaCO_3 'ün plastiğe getirdiği avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Hidrofobik yapı,
- Düşük yüzey enerjisi,
- Kolay disperse olması,
- Yüksek homojenizasyon sağlaması,
- Bazı mukavemetleri yükseltmesi,
- Daha parlak ve düzgün yüzey oluşumu sağlaması ve
- Makine aşınmalarının azalmasıdır.

Plastik üretiminde, dolgu malzemesi olarak %45 oranında CaCO_3 kullanılabilir. Ancak, bu malzemenin polimerlerde yaşlanmaya sebep olan ağır metalleri içermemesi ve yüksek kimyasal saflığa sahip olması gerekmektedir. Mermer toz atıklarının plastik üretiminde kullanılabilmesi için minimum %97 oranında CaCO_3 içermesi gerekmektedir. Polypropilen (PP), Polyamid (PA), Termoplastik (TPES) ve PVC reçineleri esas itibarıyla kalsitin dolgu olarak kullanıldığı plastik türleridir. ABD ve Avrupa'da plastik sektöründe kalsit dolgusu yılda 3 milyon tonun üzerinde kullanılmaktadır (DPT 2001).

Şahin (2007), yaptığı bir çalışmada kalsiyum karbonat mineral dolgu maddesinin polipropilen random kopolimer (PP-R) plastik boru malzemesinin performansına etkisini incelemiştir. İlave sonucunda malzemenin birim fiyatını azaltırken, bazı mekanik özelliklerde olumlu, bazı özelliklerde ise olumsuz yönde etki etmiştir. Malzemenin elastik modülü CaCO_3 içeriği arttıkça daha belirgin olarak artmıştır. Elastik modüldeki bu artış yerden döşemeli ısıtma sistemlerinde ve bilhassa toprak altında çalışan ve üzerindeki yük nedeni ile ovalleşmeye maruz kalan polipropilen atık su ve drenaj boru hatları için olumlu bir katkıdır. Dolayısıyla elde edilen daha rijit bir borunun yük altındaki ovalleşmesi azaltılmaktadır.

2.5.2.4 Kâğıt Sanayi

Kağıt karton üretiminde dolgu ve kaplama pigmenti olarak kalsiyum karbonat kullanımı, kağıt üretim teknolojisini (alkali kağıt üretimi) dünya ölçeğinde değiştirmiş, 70'li yıllarda araştırma amaçlı birkaç ton CaCO_3 tüketilirken günümüzde bu rakam milyonlarca tona ulaşmıştır (Mineset Partner Report 2002, Sabah vd. 2004).

Kağıt sektöründe, alkali kağıt üretimine geçişle birlikte, özellikle Batı Avrupa'da mikronize kalsiyum karbonata olan talebi hızla arttırmış, 20 yıl önce, kaplama pigmentleri arasında, %20 oranında öğütülmüş doğal kalsiyum karbonat (GCC) tüketilirken 2002 yılına gelindiğinde bu oran sentetik (çöktürülmüş) kalsiyum karbonat (PCC) tüketimi ile birlikte %62'lere yükselmiştir. 1980'li yıllarda tercih edilen kaolin 1992 yılından itibaren yerini CaCO_3 'e terk etmeye başlamıştır. Ürettikleri kalite kağıt ile Batı Avrupa pazarının %85'ine hakim olan 10 firma, 1996 yılından bu yana dolgu ve kaplama pigmenti olarak %85-100 gibi değişen oranlarda CaCO_3 kullanmaktadır (Sabah vd. 2004).

Özellikle Kuzey Amerika'da yaygın bir şekilde kullanılan PCC, kimyasal bir işlemde geçirildiği için kaolin, tebeşir ve GCC'ye nazaran daha yüksek saflığa sahip olup, beyazlık değeri çok daha yüksek bir pigmenttir. Kaolin, tebeşir ve mermerin beyazlık yüzdelerinin düşük olmasının nedeni değişen oranlarda renk verici safsızlıklar içermeleridir.

PCC'nin beyazlık derecesine eşdeğer düzeyde beyazlık veren doğal kalsiyum karbonat ise mikronize boyutta öğütülmüş mermerdir. Kağıt ve kartonun kaplama işlemlerinde tane inceliğinin ve formunun önemi büyüktür. Öğütülmüş doğal kalsiyum karbonatın kaplama pigmenti olarak kağıda kazandırdığı özellikler;

- yüksek beyazlık,
- yüksek katı oranı sağlaması,
- kaplama makinelerinin hızını artırma,
- düşük enerji tüketimi,
- bağlayıcı tüketiminde azalma,
- yüksek baskı kalitesidir.

Bunların yanında, kalsiyum karbonatın sertliği ve buna bağlı aşındırıcı özelliği kaolin ve talka nazaran daha fazla olduğu için üretim esnasında bıçaklarda ve elek aksamında aşınmalara neden olmakta ve üretilen kağıdın aşındırıcı özelliğini de arttırmaktadır. Baskı ve fotokopi makinelerinde bazı problemlere yol açan bu durum, CaCO₃'ün tane boyutu inceliğini arttırmakla bir ölçüde bertaraf edilebilmektedir (Erkan vd. 2001, Sabah vd. 2004).

Öğütölmüş doğal kalsiyum karbonat (GCC), karbonat ve talk kombinasyonu ile doğal CaCO₃'e yeni bir form kazandırılarak CaCO₃'ün pigment özelliği iyileştirilmektedir. Farklı kristal yapılarına sahip kalsiyum karbonat ve talk birbirleriyle muameleye tabi tutularak, kalsiyum karbonatın yüksek beyazlık vasfı, talkın tabakalı yapısı ile birleştirilmiş ve bu kombinasyon sayesinde yeni özelliğe sahip bir CaCO₃ ürünü elde edilmiştir. Sentetik (çöktürölmüş) kalsiyum karbonat üretiminde en çok tercih edilen yöntem, 900°C'de gerçekleştirilen kalsinasyon sonucu açığa çıkan CaO, suda çözölerek kireç sütü Ca(OH)₂ oluşturulur. İri tanelerin tasfiye edilmesinden sonra süspansiyona CO₂ şarjı yapılarak çöktürölmüş CaCO₃ (PCC) üretilir. Malzeme daha sonra filtre edilir, yıkanır ve kağıt sektörünün hizmetine genellikle süspansiyon halinde sunulur. Bu yöntemde CaCO₃ GCC'ye nazaran saflığı daha yüksek, parlak ve beyazdır.

Doğal kalsiyum karbonatın kimyasal çöktürme işlemi sonucunda kazanmış olduğu bu yapı ve yüksek yüzey alanı sayesinde, kağıdın opaklığı ve parlaklığı, düşük hacimlerde PCC kullanımı ile bile artmakta, yine bununla kaplama makinelerinin sorunsuz bir şekilde çalışması sağlanmaktadır (Sabah vd. 2004). Seka-Dalaman kağıt fabrikasında kaplama işleminde kullanılmakta olan CaCO₃'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

CaCO₃, özellikle sigara kâğıdı başta olma üzere gazete kâğıdı, kaliteli dergi kâğıtları üretiminde kullanılmaktadır. Yağ emme özelliğinden dolayı matbaa mürekkebinin hızlı kurumasını sağlamaktadır. Kâğıt sektöründe dolgu veya kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. CaCO₃ veya MgCO₃, kullanılması kâğıdın daha düzenli yanmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte CaCO₃ ile yapılan kâğıtlar daha dayanıklı olmaktadır. Kâğıt imalatında selölozun pişirilmesi sırasında sıvının hazırlanmasında mermer kullanılmaktadır. Pişme sıvısı, kireç taşı ile SO₂ arasında oluşan reaksiyon sonucu meydana gelir.

Çizelge 2.4 Seka-Dalaman kağıt fabrikası kullanılan CaCO_3 'ün özellikleri (Erkan vd. 2004).

KİMYASAL ÖZELLİKLER	
CaCO_3	%95 min.
MgCO_3	%2 max.
Fe_2O_3	%0,5 max.
Asitte çözünmeyen	%0,5 max.
FİZİKSEL ÖZELLİKLER	
Nem	%1 max.
Beyazlık	%95 min.
Sarıklık	%4 max.
Viskozite	700 max.
Tane boyutu <2 μ	%80 min.
>10 μ	%2 max.
>45 μ	-
Aşındırma (mg)	25 max.

Türkiye’de kağıt sektöründe 2 mikron altı % 42-44 ve kuru öğütülmüş kalsit dolguda kullanılmaktadır (DPT 2001).

2.5.2.5 Tarım ve Gübre Sanayi

Toprağın fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri, üzerinde yetişen ürünler açısından büyük önem taşır. Toprağın katı kısmı %1,5–5 oranında organik madde ve %95–99 oranında mineral maddeleri ihtiva eder. Kalsiyum oranı toprağın yapısı bakımından etkili olduğu kadar, kimyasal nitelikleri üzerinde de etkili olduğundan toprağa yeterli bir kalsiyum düzeyi sağlaması gerekir. Doğal olarak sularla yıkanma yüzünden durmadan kireç kaybettiği için toprağa zaman zaman (3–6 yılda bir) kireçli madde vermek gerekir. Kireçle toprak ıslahı için, kalsiyumlu maddeler kullanılır. Bunlar; kalsiyum karbonat, kalsiyum oksit ve dolomit gibi maddeler kullanılır (Çelik 1996).

Asit karakterli toprakların verimliliğinin arttırılması için kireçlemenin önemli bir yeri vardır. Çok eski çağlardan beri topraklara kireç verildiğinde, bu toprakların daha verimli hale geldikleri dikkat çekmiştir. Fazla miktarda verilen kireç bazı bitki besin elementlerinin alınabilirliklerini azaltmaktadır. Kirecin toprağa ihtiyacından az miktarda verilmesi halinde ise toprak reaksiyonunun istenilen seviyeye erişmemesinin bir sonucu olarak toksik miktarda bulunabilen bazı mikro elementlerin kötü etkileri giderilememektedir.

Kalsiyum oranı yüksek topraklar, canlılar için çok gerekli olan ve tabiatta bulunmayan bazı kimyasal maddeleri ve bazı mineralleri bünyesinde bulundurlar. Ayrıca topraktaki mikroorganizmaların miktarını arttırırlar. Özellikle kış ve bahar yağmurları ile dekara ortalama 8-12 kg düşen saf azotun toprakta tutunmasını sağlar, toprakta doğal yollar ile can gübresi oluşur.

Asitli topraklarda pH'yı yükseltmek için en uygun materyal kireçtir. Uygulama sonucu toprağın yapısının iyileşmesine yardımcı olur. Bu da bitki köklerinin daha iyi gelişmesi ve daha fazla verim anlamına gelir. Topraktaki organik maddenin parçalanmasına yardım ederek, humus oluşumunu teşvik eder. Toprağın yapışkanlığını azaltır, çatlamaları önler.

Tarım kireci uygulaması ile ağır killi topraklarda plastisite indisini düşürerek çok daha gevşek bir doku sağlanır, toprağın kabarması ile havalanma kabiliyeti artar. Asit topraklarda solucan sayısı çok düşük olmakta hatta bazı durumlarda tamamen yok olmaktadır. Asitlik giderilince daha gelişmiş mahsuller yetişmekte ve bu şekilde toprakta solucanların besinini teşkil eden organik madde miktarı; dolayısıyla da solucan sayısı artmaktadır. Unutmamak gerekir ki solucan çiftçinin en yakın dostudur.

Kalsiyum noksanlığında bitkiler bodur kalır. Bu durum başlangıçta kök ve yapraklarda belirgindir. Daha ileri safhalarda atık bitki dik duramaz, tepe yapraklar kıvrılıp sararır, sonunda bitki ölür. Şiddetli noksanlıklarda çiçek tomurcukları meyveye dönüşmez.

Yıllık yağış miktarı 625 mm'nin üzerinde olan bölgelerde veya fazla sulanan kireçli topraklarda kireç kullanılmalıdır. Çünkü toprakta en fazla yıkanan madde kireçtir. Dekardan yaklaşık olarak senede 15 – 30 Kg arası CaCO₃ sularla yıkanır. Bu oran yörenin yağış miktarı ve sulama suyu miktarı ile doğru orantılı artar.

Kalsiyum karbonat çevreye en az zarar veren mineraldir. Birçok yabancı ülkede toprağa zenginleştirmek için karıştırılmaktadır ve kirlenen göllerin asiditesini düşürmek için kullanılmaktadır. Tüm dünyada kalsiyum karbonat, 1925’li yıllardan beri geniş bir şekilde kullanılmaktadır. ABD’de zirai olarak yıllık tüketim miktarı 25 milyon, Türkiye’de ise bu miktar 250000 tondur. Ülkemizde yapılan araştırmalarda Samsun ve Giresun lokasyonlarında, Bornova’da yapılan denemelerde, kireç miktarları arttırıldıkça meyve veya sebze verimi de artmıştır. Kireç uygulamasıyla verim %30’a varan oranlarda artmıştır.

2.5.2.6 Yem Sanayi

Özellikle yumurta yemlerinde CaO veya CaCO₃ olarak boyutu 2 mm altında olan toz katılmaktadır. Bu oran %10–12 arasındadır. Düşük kalsiyum oranlı yemler tavuklarda yumurta verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Türk Standartları Enstitüsünün TS60 standartlarına göre mermer tozu hayvan yemi olarak kabul edilmektedir. Buna göre bileşiminde en az %92 CaCO₃ bulunan mermerler bu amaç için kullanılırlar (Çelik 1996).

Sabah ve Çelik (2001) İncehisar (Afyon) mermer atıklarının hayvan yemi katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırılmış ve ortaya çıkan sonuçları hayvan yemi katkı maddesi olarak kullanılan mermer tozu için TSE standardı (TS 8606)’na göre değerlendirerek, bu atık tozların yem katkı maddesi olarak kullanılabilceği sonucuna varmışlardır.

2.5.2.7 Boya Sanayi

Boya sektöründe 1-40 mikron boyutları arasında kuru öğütülmüş kalsit kullanılmaktadır. En yaygın kullanım boyutu 5 mikronudur. Türkiye’de boya sektöründe toplam olarak 80000 ton/yıl, dünyada da yaklaşık 8 milyon ton/yıl çeşitli boyutlarda kalsit kullanılmaktadır.

Boyalar dört ana hammaddeden oluşur;

- Bağlayıcı,
- Çözündürücü,
- Pigment,
- Yardımcı maddeler.

Bağlayıcı olarak reçine kullanılmaktadır. Boyacılar boya içindeki çözünmeyen pigmentlerin homojen ve sürekli bir film şeridi oluşturmasını, sürüldüğü yüzeye iyice yapışmasını ve parlaklık vermesini sağlar. Boya imalatında katkı maddesi olarak kullanılan kalsit (CaCO_3), özellikle sulu boyalar için önemlidir. Bunun için 10 mikronun altında ve çok saf kalsit kullanılmaktadır. Kalsitin içindeki demir oksit oranı %0,03'ten az olması istenir (Çelik 1996). Mikronize kalsiyum karbonat, boya sektöründe özellikle inşaat boyalarında iç ve dış kaplamada %25-30 oranında kullanılmaktadır. Kalsitin yüksek beyazlık oranına sahip olması parlak renk tonları sağlar. Hava koşullarına karşı dayanıklı olması yüzey kaplamalarının ömrünü uzatır. Düşük aşındırıcılığa sahip olması yüzey kaplamasının zımparalanma özelliğini iyileştirir, boya üretiminde kullanılan ekipmanın aşınmasını azaltır (Toraman 2009).

Plastik boyaların imalatında dolgu maddesi olarak bilhassa çok ince kalsiyum karbonatlar kullanılmaktadır. Bu dolgu maddelerinin boya ezme makineleri (karıştırıcı) tarafından suyun içerisinde topakçık oluşturmadan ve kıvamı zamanla artmayacak şekilde kolayca ve iyice dağılmaları mutlaka sağlanmalıdır (MEGEP 2009).

2.5.2.8 Cam Sanayi

Magnezyum ve kalsiyumca zengin kireçtaşları kullanılır. Kalsiyumca zengin olan malzeme şişe ve pencere camı, Mg'ca zengin olanlar özel cam imalinde kullanılır. Cam sanayiinde kullanılacak kireçtaşları şu özellikleri taşıması gerekir;

- CaCO_3 % 98,5
- FeO % 0,2
- Organik madde % 0,3
- Bakiye silikat % 1,0.

2.5.2.9 Kimya Sanayi

Kimya sanayiinde karpit yapımında kullanılır. Karpit, elektrik fırınlarında kireçtaşı ve kok kömürlerinin elektrik fırınlarında 1800-2100 °C'de ısıtılmasıyla elde edilir. Bir ton karpit elde etmek için yaklaşık bir ton kirece ihtiyaç vardır. Bu işlem için kullanılacak kireçtaşı saf ve yüksek kalsiyumlu olmalıdır. İhtiva edeceği safsızlıklar ise SiO_2 en fazla %1,5, MgO ise %1,0 kadar olmalıdır.

2.5.2.10 Kozmetik Sanayi

Kalsiyum karbonat yüz pudralarında büyük ölçüde kullanılır. Yüz pudralarında değişen oranlarda karıştırılarak kullanılır. Saflık, renk, parça boyutu, ucuz ve kolayca elde edilişi açısından mükemmel bir şekilde kullanılır. Kalsiyum karbonat mat olduğundan dolayı talkın parlaklığını alır, teri adsorbe eder ve yağa karşı direnç gösterir. Yüzü pürüzsüz bir şekilde örtebilir ve ciltte kayganlığı kaldırarak kuru bir görünüş kazandırır. Parça boyutu genellikle 2-10 mikron arasındadır.

Kalsiyum karbonatın, fiziksel ve kimyasal doğasından kaynaklanan bazı sakıncaları vardır. Formülde çok fazla kullanılırsa, gözenekli oluşundan dolayı, yapışkanlığın ve aşırı emilişinden dolayı sıcak iklimlerde çizgilenmenin nedeni olabilir (Geçgil 1988). Kozmetik sektöründe ayrıca diş macunu ve diş tozunda da kullanılmaktadır.

2.5.3 Diğer Kullanım Alanları

Soda imalinde, refrakter malzeme imalinde, oto lastiği imalinde, patlayıcı malzeme imalatında, temizlik malzemeleri, haşere öldürücü ilaçlarda kalsiyum karbonat kullanılmaktadır. Ayrıca madencilikte;

- Yeraltı işletmeleri,
- Cüruf yapıcı,
- Flotasyon
- Kalsine dolomit üretiminde kullanılır.

Farklı kullanım alanları ile ilgili yapılan bir çalışmada, traverten fabrika atıklarının dolgu işlemlerinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Traverten örnekleri üzerinde, çimento dolgu olarak nitelendirilen dolgunun karakteristik malzemeleri kalsit, portland çimentosu, kaolen gibi malzemeler ile hem mermer farika atıklarının değerlendirilmesi hem de dolgu maliyetinin düşürülebilmesi için dolgu karışımında kayacın kendi toz artığının (kek) farklı yüzde oranlarında kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, tasarlanan dolgu karışımlarının uygulandığı traverten malzemelerde fiziksel ve mekaniksel değişim ve gelişmeler değerlendirilmiştir (Kun vd. 2006).

Kalsiyum karbonat; gerek demir cevherinin işlenmesi, gerekse demir ve çelik elde edilmesi esnasında önemli bir yere sahiptir. Kalsiyum karbonat demirin ve çeliğin içerisindeki istenmeyen safsızlıklarla kimyasal reaksiyona girerek bunların curuf şeklinde bünyeden ayrıştırılmasını sağlar. Bu şekilde oluşan curuf ise çimento ve yol yapımında kullanılır. Ayrıca bakır cevherinin flotasyonu sırasında safsızlıkların giderilmesinde ve uygun pH değeri temininde kullanılır.

BÖLÜM 3

BOYUT KÜÇÜLTME

Boyut küçültme katı maddelerin az veya çok sayıda parçalara ayrılması ile yeni yüzeylerin oluşturulması demektir. Tüm cevher hazırlama işlemlerinde gerekli olan bir ön işlemdir. Tane boyutunu küçültmek için uygulanan yöntemler için kırma ve öğütme terimleri kullanılır. Kırma, cevherin sağlam katı yüzeyler arasında ezilmesiyle ufalanması veya sert bir cismin çarpma hareketlerine maruz kalarak ufalanması işlemidir. Öğütme ise cevherin serbest hareket eden bilya, çubuk, çakıl vs. gibi öğütücü ortamın arasında aşınma, basınç ve çarpma hareketleriyle küçültülmesi işlemidir. Kırmada elde edilen ürün boyutu, öğütmede elde edilen ürün boyutuna göre daha iridir.

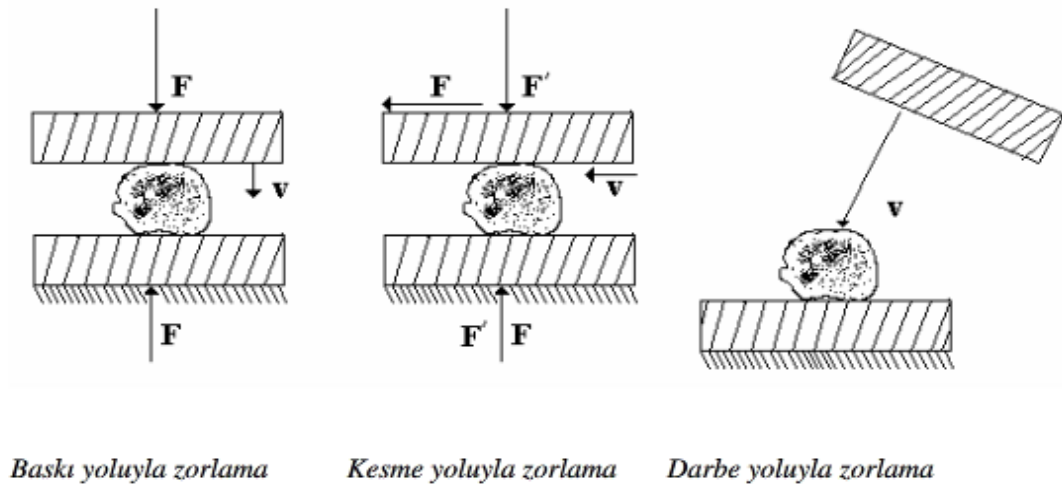
Boyut küçültme, dünya genelinde harcanan elektrik enerjisinin %3 ile %4 gibi bir kısmının ve tipik bir cevher hazırlama tesisinde ise ihtiyaç duyulan toplam enerjinin %70'lik bir kısmının harcandığı önemli bir süreçtir. Pahalı bir işlem olan boyut küçültme işlemlerinde, cevheri istenen boyutun altına küçültmek, fazladan masraflara yol açacağından gereksizdir. Bu nedenle boyut küçültmede en küçük bir kazancın sağlanması, enerji maliyetinin azaltılmasına çok fazla etkisi olacaktır (Deniz 2004). Boyut küçültme işlemleri, cevher hazırlama tesisleri, kimya endüstrisi, çimento endüstrisi, seramik endüstrisi ve metalürji gibi çeşitli endüstri dalları içinde büyük önem taşımaktadır.

3.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN ESASLARI

Birçok malzeme atomların üç boyutlu olarak düzenli bir yerleşim gösterdiği kristal yapıya sahiptirler. Atomların düzeni, onları birlikte tutan fiziksel ve kimyasal bağların boyut ve çeşitleriyle belirlenir. Bu atomsal bağlar, minerallerin kristal kafeslerinde yalnızca kısa bir mesafede etkilidir ve çekme kuvveti ile atomlar birbirinden uzaklaştırıldıkları zaman bu bağlar bozulabilir. Bağların kopmasına neden olan bu tür gerilmeler, çekme ya da basma kuvvetleriyle sağlanabilir (Pilevneli 2003).

Kayaçlar farklı tipte ve farklı boyutta minerallere sahip olduklarından, genel olarak homojen yapıya sahip değildirler. Düzgün olarak dağılmış bir yüke maruz kaldıkları zaman, eşit olarak yükleme yapılsa bile kayacın içindeki gerilimler düzgün yayılım göstermez. Cevher parçasının kırılmasını incelerken minerallerin mekanik özellikleri önemlidir; ama mineralleri bir arada bulduran matris içinde bulunabilecek çatlaklar ve kusurlar daha çok önem taşımaktadır. Boyut küçültmede değişik kuvvetler etkin olmaktadır. Bunlar çarpma, basma, çekme, kesme, eğilme, burulma, aşındırma ve çentme olarak adlandırılabilir (Wills 1985, Ergin 1999).

Baskı yoluyla boyut küçültme birçok kırma makinesinde etkilidir. Biri genellikle sabit diğeri hareketli ve zorlamayı ileten iki çalışan yüzey arasında, taneler periyodik olarak gidip gelme hareketi sırasında basınca tabi tutulurlar. Kesme yoluyla zorlama, nispeten küçük olan baskı kuvvetlerinin yanı sıra genellikle daha büyük ters yönlü kesme kuvvetlerinin etkisi altında kendisini gösterir. Darbe yoluyla zorlama birkaç önemli kırma makinesinde etkindir. Bunlarda çalışan yüzeyler, konik kırıcılarıdaki dış koniler gibi sabittirler veya tambur değirmenlerdeki öğütücü cisimler gibi hareketlidir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kırma makinelerinde mekanik zorlama tarzları.

Çarpma yoluyla ufalama, diğerk zorlama cinslerinden başkadırlar. Bu tip zorlama, yüksek hızdaki serbest hareket eden tanelerin sabit bir çarpma elemanına veya bir diğerkine çarpması halinde söz konusudur. Parçalanma öncelikle zayıf olan tane sınırları boyunca olduğundan, selektif bir boyut küçültme söz konusudur.

3.2 BOYUT KÜÇÜLTME KANUNLARI

Boyut küçültme işlemleri bilim adamları tarafından sürekli olarak araştırılmıştır. Katı bir cismin iç bağlantı kuvvetlerini yenecek kadar bir dış kuvvetin uygulanması sonucu, cisim daha küçük parçalara bölünmekte ve böylece, kırma veya öğütme olayı gerçekleşmektedir. Dış kuvvetin uygulanmasına harcanacak güç ile bu güce karşı elde edilen sonuçlar arası bağlantılar üzerine günümüze kadar üç önemli kanun ortaya atılmıştır. Bunlar 1867’de Rittinger’in, 1885’de Kick’in ve 1951’de Bond’un ortaya çıkardıkları kanunlardır.

3.2.1 Rittinger Kanunu (Yüzey Teorisi)

Rittinger boyut küçültmede harcanan enerjinin, oluşan yeni tane yüzey alanları ile orantılı olduğunu savunmaktadır. Rittinger kanunu yüzey alanı üzerinden basit olarak aşağıda verilen Eşitlik 3.1 ile ifade edilir.

$$E=C_r (S_2-S_1) \quad (3.1)$$

Burada;

E: Verilen enerji (kWs/t)

S₁: Besleme malzemesinin yüzey alanı (cm²/cm³)

S₂: Ufalanmış malzemenin yüzey alanı (cm²/cm³)

C_r: Rittinger sabiti

Rittinger, taneleri küp şeklinde kabul etmiştir. D boyutlu küpün yüzey alanı 6D²’dir. Boyut küçültme kademesinde D boyutlu küp yarıya bölünürse, 8 adet D/2 boyutlu küp meydana gelecektir. Böylece yeni yüzey alanı, 8x6(D/2)²=12D²’dir. Boyut küçültme kademesinde D boyutlu küpün boyut küçültme oranı 4 olacak şekilde D/4 boyutuna ufalandığını düşünürsek meydana gelen yeni küp sayısı 64 ve elde edilen yeni yüzey alanı, 64x6(D/4)²=24D² olacaktır. D/2 boyut küçültmeden sonra yüzey alanı artışı, 12D²-6D²=6D² olarak gerçekleşirken, D/4 boyut küçültmeden sonra yüzey alanı artışı, 24D²-6D²=18D² olmaktadır. Boyutu x olan bir küpü kırmak için gerekli enerji, küpün hacmi x³ ile orantılıdır. Çatlak meydana gelince gerilme nedeniyle enerji yüzeye çıkar ve x² ile orantılı olur. Birim hacimdeki malzemenin yüzey alanı, x²/x³=1/x olarak düşünülürse, Rittinger kanununu aşağıdaki Eşitlik 3.2 ile ifade etmek mümkündür.

$$E=C_r \left[\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right] \quad (3.2)$$

Burada;

x_1 : Beslenen malzemenin tane iriliği

x_2 : Ufalanmış malzemenin tane iriliği olmaktadır.

Yapılan çeşitli enerji hesaplamaları ve deneysel veriler, boyut küçültmede Rittinger'in öngördüğünden çok daha fazla enerji harcadığını, bu enerjinin ancak %1 kadarının yeni yüzeylerin oluşması için yeterli olduğunu göstermiştir. Geri kalan enerji ise, önemli ölçüde ısı enerjisi şekline dönüşmektedir.

3.2.2 Kick Kanunu (Hacim Teorisi)

Kick, olayı tane hacmi küçülmesi yönünden ele almakta ve homojen kayaçların kırılmasında hacim küçülmesi ile orantılı bir enerji sarfi gerektiğini iddia etmektedir. Kanunun ifadesi; "Geometrik olarak birbirine benzer iki cisimde aynı derecede boyut küçültme elde etmek için gerekli enerji, bu cisimlerin hacimleri (veya ağırlıkları) ile orantılıdır. Diğer bir deyişle; belirli hacimsel değişmeler için aynı enerji sarfiyatı gereklidir" demektedir.

Kick, hipotezinde tanelerin küp şeklinde olduğunu kabul ederek boyut küçültmede sarf edilecek enerjiyi boyut küçültme oranı ile ilişkilendirmiştir. Aynı boyut küçültme oranları için aynı miktarda enerji harcanacağını savunmaktadır. Örneğin; D boyutlu bir küp D/2 olarak ufalandığında, boyut küçültme oranı 2'dir. Bu boyut küçültme için E enerjisine gerek varsa, D/2 boyutundan D/4 boyutuna ufalandığında da, boyut küçültme oranı 2 olacağından, aynı enerjiye gerek vardır şeklinde ifade etmektedir. Yani 1 ton malzeme 10 cm'den 5 cm'ye indirildiğinde, boyut küçültme oranı 2 olup, gerekli enerji E'dir. Aynı şekilde, 5 cm'den 2.5 cm'ye ufalanınca boyut küçültme oranı 2 olup gerekli enerji yine E'dir tezini savunmuştur. Boyut küçültmenin kolektif karakterini de göz önünde bulundurarak Kick, kanununu matematiksel olarak aşağıdaki Eşitlik 3.3 ile ifade etmiştir.

$$E=C_k \log \frac{x_1}{x_2} \quad (3.3)$$

Burada;

x_1/x_2 : Boyut küçültme oranı

C_k : Kick sabitidir.

Ancak yapılan pratik ölçümler Kick kanununun gerçekte elde edilen sonuçlara Rittinger teorisinden daha çok uyumsuzluk gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Kayaç kırılması, homojen bir işlem olmayıp kayaç içindeki pek çok sayıda düzensizlikler tarafından kontrol edilmektedir. Bunlar çeşitli çatlaklar, kristal düzlemleri, dislokasyonlar ve farklı tane boyutlarında oluşan çok çeşitli zayıflık bölgeleridir. Bu çok değişken zayıflık bölgeleri nedeniyle kayaç, hesaplanan teorik homojen elastik limitinin çok altında bir gerilme kuvveti ile kırılabilmektedir. Ayrıca bu kanunun tersine boyut küçültmenin, Rittinger teorisinde olduğu gibi, malzeme inceldikçe zorlaştığı bilinmektedir. Her boyut küçültme adımı (x_1/x_2) için gerekli enerji miktarı artmaktadır. Halbuki Kick teorisinde aynı boyut küçültme oranları için enerji sabit kalmaktadır.

3.2.3 Bond Kanunu

Bond; Rittinger ve Kick teorilerine karşı çıkmış ve “Boyut küçültmede faydalı iş meydana getirilen çatlak uzunluklarıyla orantılıdır” görüşünü savunmuştur. Çatlak uzunluklarının ise kırılma sonunda yeniden meydana gelen yüzeylerin karekökü ile ters orantılı olduğu bulunmuştur.

Boyutu x olan bir küpü kırmak için gerekli enerji küpün hacmi, x^3 ile orantılıdır. Çatlak meydana gelince gerilme nedeniyle enerji yüzeye çıkar ve x^2 ile orantılı olur. Düzensiz parçalar kırılınca enerji kayaç içinde eş dağılımlı olarak dağılmadığından x^2 ile x^3 arasında orantılı olarak değişir. Ortalama değeri ise $x^{2.5}$ ile orantılı olmaktadır (Rittinger ile Kick teorileri arasında bir değer). Birim hacimdeki düzenli tanelerin sayısı $1/x^3$ ile orantılı değiştiğinden, birim hacimdeki parçayı kırmak için gerekli enerji $x^{2.5}/x^3=1/\sqrt{x}$ ile orantılıdır. Böylece x_1 : kırılacak tane ebadı, x_2 : kırılmış tane ebadı ise lüzumlu enerji: $1/\sqrt{x_2} - 1/\sqrt{x_1}$ ile orantılıdır.

Bond teorisinin genel matematiksel ifadesi aşağıda Eşitlik 3.4 ile verilmektedir.

$$E=2C_B \left[\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right] \quad (3.4)$$

Pratik amaçlar için, x_1 yerine kırılacak malın %80'inin geçtiği elek açıklığı, x_2 yerine kırılmış malın geçtiği elek açıklığı alınabilir. Her malzemenin boyut küçültme için ihtiyaç göstereceği enerji miktarı farklıdır. Bond “İş Endeksi” (malzemelerin kırılma ve öğütmeye karşı gösterdikleri direnci ifade eden bir parametre) diye bir değer tanımlamış ve bunu “Sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelmiş bir malzemenin birim ağırlığının (örneğin;1 ton) %80'i 100 μm altına geçecek şekilde boyut küçültülmesi için gerekli enerji” olarak tarif etmiştir. Söz konusu teori aşağıda Eşitlik 3.5 ile ifade edilir.

$$E=W_i \left[\frac{10}{\sqrt{x_2}} - \frac{10}{\sqrt{x_1}} \right] \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.5’de;

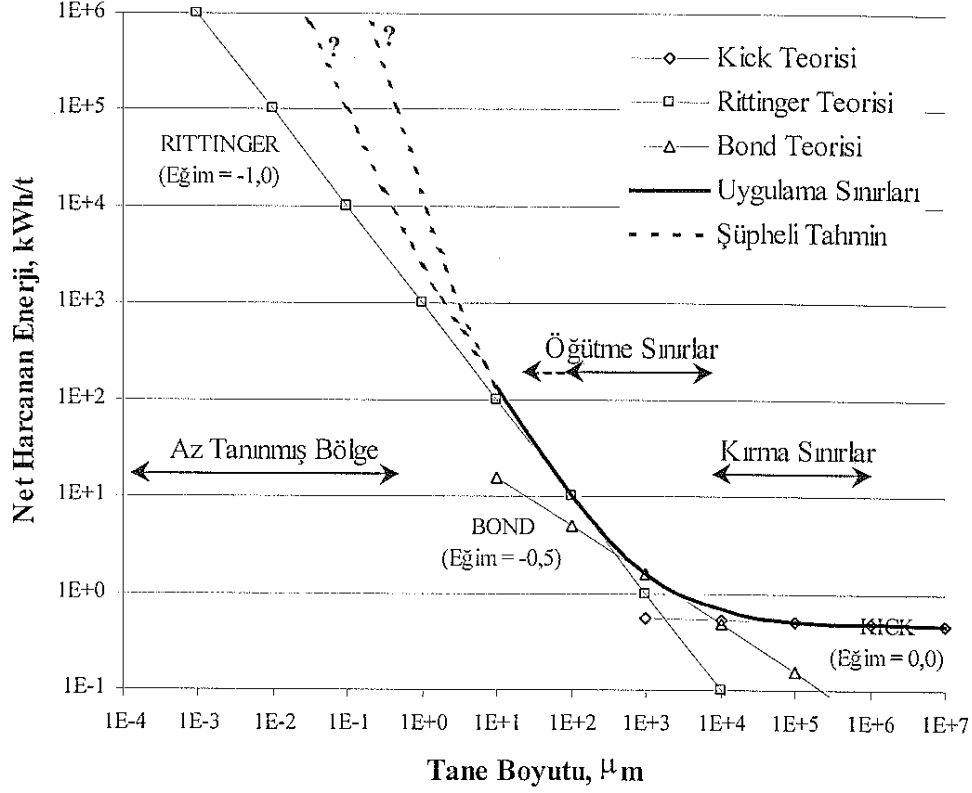
E: Birim ağırlığı kırmak için gerekli enerji, (kWs/t)

W_i : İş endeksi, (kWs/t)

x_1 : Kırılacak malzemenin %80’inin geçtiği elek ebadı, (μm)

x_2 : Kırılmış malzemenin %80’inin geçtiği elek ebadı (μm).

Cevher hazırlamada çoğunlukla heterojen cisimler söz konusudur. Bu nedenle W_i , farklı yataktan alınan aynı cevher için dahi değişmektedir. Minerallerin doğal hallerinde bir tane büyüklüğü vardır. Bu büyüklükten daha iri ve daha ince boyutlara boyut küçültme işlemlerinde iş indeksi değişir. Ayrıca kırıcı aletin randımanı da iş indeksini etkiler. Bazı maddelerin iş indeksleri literatürde tablolar halinde verilmektedir. Ancak tam doğru sonuç için her malzemenin iş indeksini laboratuarlarda, uygulamada kırılacak boyuta yakın bir boyutta tayin etmek gerekir. Bu üç teorisinin yorumunu yapan Hukki (1961) teorilerin belirli boyut sınırlarında geçerli olduğunu göstermiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Boyut küçültmede tane boyutuna karşılık harcanan net enerji (Lynch 1977).

3.3 ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK

Öğütülebilirlik malzemenin öğütülmeye karşı gösterdiği direnç olarak adlandırılabilir. İş indeksi cevherin öğütülebilirlik özelliklerine bağlı olup, değirmenlerin boyutlandırılmasında, enerji tüketimi hesaplamalarında, öğütme devrelerinin verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan bir üretim parametresidir. Öğütme ne kadar kontrollü yapılırsa, ürünün fiziksel ve kimyasal özellikleri de o derece kontrol edilebilir. Öğütme zamanı da hem enerji hem de kapasite açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla öğütme, üretimin hassas dengelerini oluşturur.

Öğütülebilirlik deneyleri iki kategoride incelenirler. Birincisi, Bond iş indeksi deneyleri ile belirlenir ve belli bir boyuttan daha ince olan malzeme miktarının üretimi için gerekli olan enerjiyi ölçer (Bond and Maxon 1938, Bond 1947, 1961). İkinci kategori deneyleri ise, Hardgrove indeksi (Hardgrove 1938) ile belirlenir. Standart bir besleme boyut aralığı ve miktarı ile öğütülebilirliği değerlendirmek için uygulanır (Mcintyre and Pitt 1980).

3.3.1 Bond Öğütülebilirlik Deney Yöntemi

Bond öğütülebilirlik testinde, numunenin 6 mesh'in (-3,35 mm) altına geçecek şekilde kademeli olarak kırılır ve kırılan malzemeden 8-10 kg alınarak teste tabi tutulur. Genel olarak 65-100 mesh'lik elekler kullanılır. 6 mesh altına kırılan malzemeden konileme dörtleme yöntemiyle yaklaşık 1 kg numune alınır ve bu numunenin boyut analizi yapılır. Logaritmik düzende tane boyuna karşılık birikimli elek altı grafiği çizilerek, beslemenin %80'inin geçtiği boyut ($F, \mu\text{m}$) belirlenir. Numune 1000 cm^3 'lük dereceli mezüre 700 cm^3 'lük standart hacim elde edilinceye kadar doldurulur. 700 cm^3 'lük hacim tartılır (w). Bu miktar değirmene beslenecek miktar olup test süresince bu miktar sabit tutulur.

Deneyde "Bond değirmeni" olarak da adlandırılan $30,5 \times 30,5 \text{ cm}$ boyutlarında, kenarları yuvarlatılmış, içerisinde kaldırıcı plakaları bulunmayan, üzerinde $10,2 \times 20,4 \text{ cm}$ ebatlarında bir boşaltma kapağı bulunan, 70 dev/dk hızında çalışan bir bilyalı değirmen kullanılır. Şarj malzemeleri olarak 285 adet toplam 20125 gram ağırlığında, çapları 38,1-12,7 mm arasında değişen çelik bilya kullanılır. Değirmenin hacmi $22272,5 \text{ cm}^3$, bilyaların hacmi boşluksuz olarak 2810 cm^3 , bilyalar arası boşluğun hacmi 1920 cm^3 ve bilya yükünün toplam hacmi ise 4730 cm^3 'tür.

Standart 700 cm^3 'lük hacimdeki ve kütlesi belli olan numune değirmene bilyalarla birlikte tek tabaka oluşturulacak şekilde beslenir. Değirmen ilk dönüş (N_1) sayısı 100 devir ile denemeye başlanır. Değirmen seçilen devir sayısını tamamladıktan sonra öğütme testinde numunenin tamamen öğütülmesi istenen tane boyutuna eşdeğer göz açıklığı (P_1) referans eleğinden numune elenir. Elek üstü tartılır ve bulunan kütle değirmene konan kütleden çıkartılarak elek altının kütlesi (a) tespit edilir.

Başlangıçta yapılan elek analizi ya da birikimli elek altı grafiğinden faydalanarak değirmene konan yükteki P_1 referans eleğinin altına geçecek olan numunenin kütlesi (b) bulunur. Bulunan miktar, elde edilen elek altı kütlesinden çıkartılarak net kütle ($a-b$) bulunur. Net kütle, değirmen dönüş sayısına bölünerek bu periyottaki öğütülebilirlik (G_{bp1} , gr/dev) tespit edilir.

İkinci periyotta değirmenden çıkan miktara (a) eşit miktarda malzeme değirmen beslenir. Değirmene uygulanacak dönüş sayısı, eklenen miktardaki (a) P₁ referans eleği boyutundan ince malzeme (c) daha önce yapılan elek analizinden faydalanılarak tespit edilir. Bu periyotta değirmendeki malzemenin kütlece %28,6'sının öğütülmesi beklenir. Dolayısıyla değirmendeki numunenin %28,6'sına tekabül eden kütle (d) gram olarak tespit edilir. Bu şekilde elde edilen d ve c kütleleri arasındaki fark bulunur ve bulunan değer 1. periyotta elde edilen G_{bp1}'e bölünerek 2.periyottaki dönüş sayısı (N₂) tespit edilir. Bulunan devir sayısı uygulanarak işlem devam ettirilir. Değirmendeki yükün kütlece %28,6'sının öğütülmesi standart denge şartlarında kütlece %250 dönüş yükü verir. Bu andan itibaren yukarıdaki adımlar öğütülebilirlik değerleri (G_{bp}) dengeye gelinceye kadar tekrar edilir. Yapılan işlemde dengeye ulaşıldığında, elde edilen son üç teste ait değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak ortalama öğütme değeri (G_{bp}) bulunur. Son üç periyottaki P₁ referans eleği boyutundan ince malzemeler birleştirilerek elde edilen malzemenin elek analizi ile tane boyut dağılımı bulunur. Bulunan sonuçlardan numunenin kütlece % 80'inin geçtiği tane boyutu (P,µm) tespit edilir. İşlemden elde edilen değerlerle öğütme iş indeksi (W_i) aşağıdaki eşitlik 3.6 ile hesaplanır (Bond 1961, TSE 7700, İpek 2003, Samanlı 2008).

$$W_i = \frac{44,5}{P_1^{0,23} \times (G_{bp})^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \times 1,10, \text{ (kWs/t)} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da;

W_i: İş indeksi, (kWs/t)

P₁: Öğütülmesi istenen tane boyutuna eşdeğer göz açıklığı (µm)

G_{bp}: Öğütülebilirlik değeri (gr/dev)

P: Malzemenin kütlece %80'inin geçtiği tane boyutu (µm)

F: Beslemenin %80'inin geçtiği boyut (µm)

Referans enerji gerekliliğine etki eden altı farklı faktör vardır. Bu faktörler, kuru öğütme, açık devre öğütme, besleme boyutu, çap etkisi, % 80'i 70 µm'den daha ince ürün boyutları için bilyalı değirmendeki ince öğütme ve bilyalı değirmenin boyut küçültme oranıdır.

3.3.2 Hardgrove Öğütülebilirlik Deney Yöntemi

Yöntemde her biri $25,4 \pm 0,13$ mm çapında olan 8 adet bilyanın hareket ettiği bilya yuvasından oluşan laboratuvar değirmeni kullanılır. Bir üst öğütme bileziğiyle hareket ettirilen bilyalar 20 ± 1 dev/dk hız ile döndürülür ve $29 \pm 0,2$ kg toplam basınçta güç sarf ederler. Deneyde kullanılacak numune boyutu $-1190+590 \mu\text{m}$ ' dır. Bu boyut aralığına kırılmış, 100°C 'de nemi uzaklaştırarak desikatörde soğutulmuş malzemedan $50 \pm 0,01$ gram alınarak değirmen 60 tur döndürülür ve $74 \mu\text{m}$ 'lik elekten elenir. Elek altı belirlenerek malzeme öğütülebilirlik değeri aşağıdaki Eşitlik 3.7 kullanılarak hesaplanır (Hardgrove 1938, Remeyni 1974, Avşar 1996).

$$\text{HGI} = 13 + 6,93D_{74} \quad (3.7)$$

HGI: Hardgrove öğütülebilirlik indeksi,

D_{74} : $74 \mu\text{m}$ elek altı miktarı (gr).

Deney esnasındaki malzeme kaybı $0,4$ gramdan fazla olduğunda deney tekrar edilmelidir. Eşitlik 3.8 kullanılarak Hardgrove öğütülebilirlik indeksi ile Bond iş indeksi arasında aşağıdaki ilişkisi geliştirilmiştir (Bond 1961).

$$W_i = \frac{435}{\text{HGI}^{0,5}} \quad (3.8)$$

W_i : İş indeksi, (kWs/t)

HGI: Hardgrove öğütülebilirlik indeksi.

3.4 ÖĞÜTME

Öğütme kırma sonrası boyut küçültme işlemlerinin son aşamasıdır. Öğütme işlemi yatay veya dikey eksenleri etrafında dönen ve değirmen adı verilen aygıtlarla yürütülür. Bu işlemde cevher tanelerine darbe, sıkıştırma, ezme, kesme ve sürtme kuvvetleri uygulanarak, kuru veya yaş olarak ufalanır. Öğütücü ortam bilya, çubuk, çakıl, öğütülecek cevherin iri parçaları veya başka bir cevher olabilir. Değirmen içinde öğütme, aktarılan ortamın boyutu, miktarı, hareket türü ve aralarındaki boşluk gibi faktörlere bağlıdır.

Öğütme, cevher hazırlama işlemleri içerisinde halen en çok enerji tüketen işlem kademesi olup, bu alanda kullanılan toplam enerjinin yarısından fazlasını oluşturmaktadır. Bu yüzden tesislerin iyileştirilmesi, doğru ekipmanlar ile donatılması ve enerji tasarrufunu sağlayıcı yöntemlerin uygulanması gerekmektedir. Bu bağlamda cevherin özelliğine uygun olmayan bir değirmenin seçilmesi işletme maliyetlerini daha da arttıracığı kesindir.

3.4.1 Çubuklu Değirmen

Çubuklu değirmenler, ince kırıcı olarak ele alınabilecekleri gibi kaba öğütme araçları olarak ta kullanılabilirler (Şekil 3.3). 50 mm boyutundaki malzeme 300 mikrona kadar öğütülebilir. Değirmenlerin en belirgin özelliği uzunluklarının çaplarının 1,5 ile 2,5 katı olmasıdır. Değirmen çubuklarının eğilmemesi için 6 metreden uzun olmaması istenir. Çapları 25-150 mm arasında değişen çubuklar değirmene şarj edilirler. Çubuk şarj oranı hacmin %35'i olduğunda en ideal öğütme elde edilir.

Çubuklu değirmenlerin iç yüzeyleri, aşınmaya dayanıklı astarlarla kaplanır. Çubuklu değirmenlerin diğer değirmenlere göre en önemli avantajı, çubuklar arası boşluk az olduğundan dolayı öğütme veriminin daha yüksek olmasıdır.



Şekil 3.3 Çubuklu değirmen.

3.4.2 Bilyalı Değirmen

Birim ağırlık için bilya yüzey alanı çubuklardan daha fazla olduğu için bilyalı değirmen ince öğütme için daha uygundur. Uzunluk/çap oranı 1-1,5 arasındadır. Öğütme işlemi yaş ve kuru olarak yapılabilir. Bilyalar mümkün mertebe en küçük ve öğütülen malzemenin en iri boyutunu öğütebilecek boyutta seçilmelidir. İri öğütmede 10-2 cm bilyalardan, ince öğütmede ise 5-2 cm'lik bilya çapları ile bir karışım şarj edilir. Şarj miktarı değirmen iç hacminin %40 -50 'si kadardır. Değirmene verilmesi gereken enerji şarj miktarı ile artar. Değirmen hacminin %50 'si kadar şarj verilirse, gerekli enerji maksimum olur.

Bilyalı değirmenler; silindir gövdeli değirmen, silindirokonik gövdeli değirmen ve konik gövdeli değirmen olmak üzere farklı gövde şekillerine sahip olabilmektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Konik bilyalı değirmen ve tüp tipi bir değirmen (Hacıfazlıoğlu 2009).

3.4.3 Otojen Değirmen

Otojen öğütme, tüvenan veya iri kırılmış cevherin, herhangi bir öğütücü ortam kullanılmaksızın, bir değirmende öğütülmesi işlemi ifade eder. Yarı otojen öğütme tüvenan veya ince kırılmış cevherin, bir değirmende bilyaların da kullanılmasıyla öğütülmesi demektir (Şekil 3.5).

Otojen öğütme yaş veya kuru olarak uygulanabilir. Değirmen içerisinde öğütme olayı çatlatma, kesme ve aşındırma kuvvetleri ile gerçekleştirilir. Kuru öğütme killi malzeme için uygun değildir, çevre sorunu daha fazladır ve öğütme kontrolü yaşa nazaran zordur.

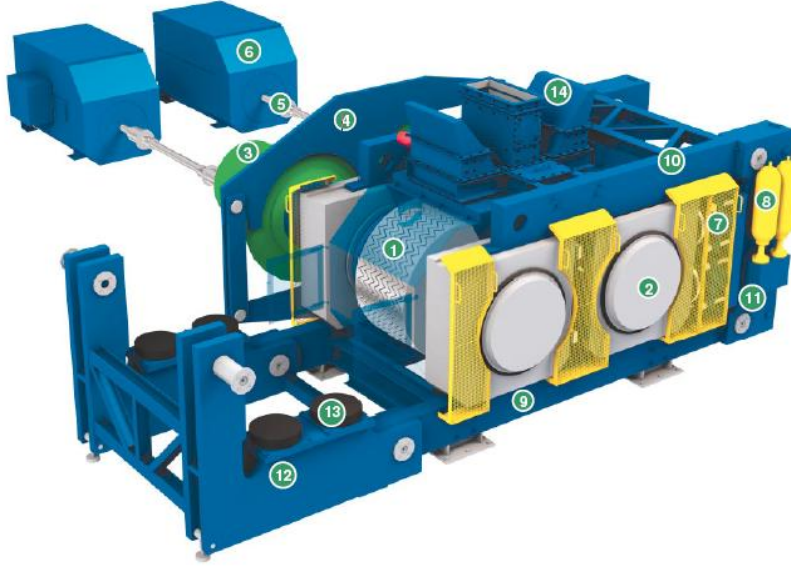


Şekil 3.5 Otojen değirmen.

3.4.4 Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmen

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler ters yönde dönen iki merdaneye sahip olup merdanelerden birisi sabit bir yatağa oturtulmuşken, diğeri hidrolik bir sistem aracılığıyla sabit merdaneye doğru itilmektedir. Bu esnada iki merdane arasında yapılan besleme ile taneler ezilerek ufalanmaktadır. Basınç, boyut küçültme işlemini kontrol eden en önemli parametredir. Şekil 3.6'da yüksek basınçlı merdaneli değirmen genel görünümü ve açıklamaları verilmiştir.

Yüksek basınçlı merdaneli değirmenler bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldıklarında %50 enerji tasarrufu sağlamakta, astar aşınması daha az, ömürleri ise bilyalı değirmenlere oranla 10-20 kat daha fazla olmaktadır. Gürültü problemi daha az ve işletilmeleri çok kolaydır. Dezavantajları ise bu tip öğütücülerin yalnızca gevrek yapılı yumuşak ve orta sertlikteki aşındırıcı olmayan malzemelere uygulanabilmesidir.

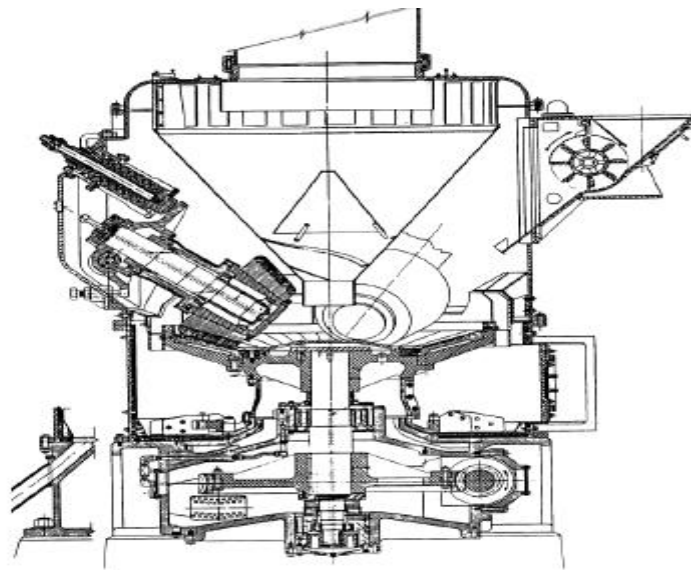


1. Öğütme merdaneleri
2. Küresel yatak
3. Redüktör
4. Tork kolu aranjmanı
5. Emniyet gevşetme kaplini
6. Ana motor
7. Hidrolik basınç silindirleri
8. Nitrojen dolu cepli akümülatör
9. Altı şasi
10. Üst şasi
11. Arka seksiyon
12. Mentşeli L-şekilli seksiyon
13. Elastometer kesme yatağı
14. Besleme kontrol kapısı

Şekil 3.6 Yüksek basınçlı merdaneli değirmen.

3.4.5 Valsli Değirmen

Valsli değirmenler, kömür, fosfat, kireçtaşı gibi gevrek malzemelerin öğütülmesinde kullanılır. Bu değirmenlerde öğütücü rulolar sabit veya hareketli bir tabla üzerinde dönmekte, tabla ve rulo arasında kalan malzeme sıkışma ile öğütülmektedir. Öğütülmüş malzeme ortamdan havalı separatörlerin oluşturduğu hava akımı alınır. Düşük enerji maliyeti, yüksek kapasiteli olması avantajlarıdır. Yalnız kuru öğütme yapması ve aşınma probleminin olması ise dezavantajlarıdır. Şekil 3.7’de valsli değirmenler gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Valsli değirmen.

3.4.6 Jet Değirmen

Jet değirmenlerde, değirmen gövdesi içine çok yüksek basınçlarda verilen hava ile tanelerin birbirine ve değirmen gövdesine çarpması sonucu darbe ve aşınma etkisiyle öğütme gerçekleşmektedir. Besleme boyutu genellikle 0,5 mm'nin altında olan bu tip değirmenler ile birkaç mikron düzeyine öğütme yapmak mümkündür. Sistemdeki öğütülmüş malzeme ise akışkanın hareketi ile taşınarak havalı bir separatörden geçmekte ve ince taneler ayrıldıktan sonra iri tanelerle birlikte tekrar sisteme geri dönmektedir. Bu tip değirmenlerde akışkan ortam olarak; sıcak basınçlı buhar, hava veya herhangi bir inert gaz kullanılabilir. Gazların basınçları ise malzemenin sertliğine göre 100 ile 200 psi arasında olabilmektedir (Yüce 2008).

Jet değirmenler endüstriyel ölçekte yaygın olarak kullanılmasa da; bazı tesislerde silis, feldspat, cam ve zirkon gibi aşındırıcı malzemelerin öğütülmesi için kullanılmaktadır. Daha çok plastik, polimer, pigment ve pestisit gibi malzemelerin mikron boyutuna öğütülmesi için kullanılmaktadır. Kapasiteleri 0,5 ile 5000 kg/saat arasında değişmektedir.

3.4.7 Titreşimli Değirmen

Titreşimli değirmenler Şekil 3.8'de görüldüğü gibi üst üste yerleştirilmiş öğütme odalarından oluşmaktadır. Lastik bir takoz veya yaylar üzerinde yer alan bu odalara belirli bir hızda titreşim verilerek oda içerisindeki malzeme ve bilyalar hareket ettirilmektedir. Hareket eden bilyaların cevherleri ezmesi ve sıkıştırması sonucunda taneler ufalanmaktadır.

Bilya şarj oranı hacimce %60-70 oranındadır. Bilyaların boyutu ise 10-15 mm arasındadır. Titreşimli değirmenler ile 10 mikron boyutuna kadar öğütme yapmak mümkündür. Öğütme odaları yatay olarak yerleştirilebilir. En önemli avantajı ince öğütmede enerji verimliliğinin yüksek, ilk yatırım maliyetinin düşük olmasıdır. Genellikle linyit, taşkömürü, kireçtaşı, bentonit, jips, boksit, bakır, demir, ferrosilikon ve alüminyum oksitlerin ince öğütülmesi için kullanılmaktadır (Yıldız 2007).

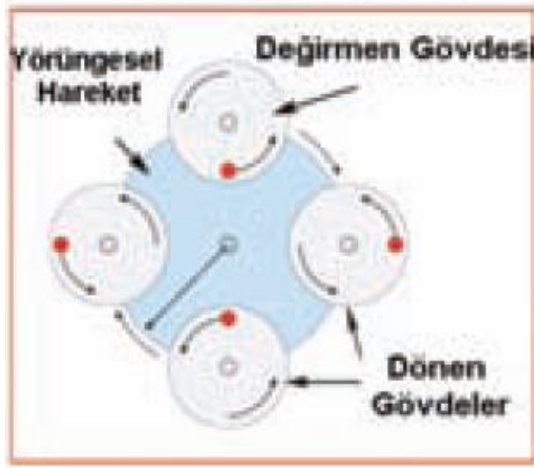


Şekil 3.8 Titreşimli değirmen ve kesit görünüşü (Hacıfazlıoğlu 2009).

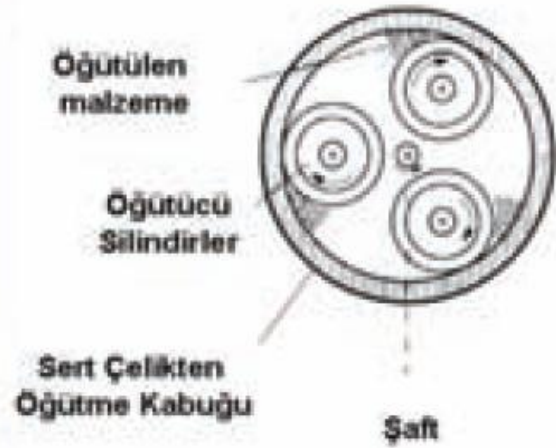
3.4.8 Yörüngesel Değirmen

Yörüngesel değirmenler mikronize öğütme yapmak için geliştirilmiş olan bir çeşit bilyalı değirmen tipidir. Yörüngesel ismi, değirmen gövdesinin dönmesinden gelmektedir. Bir yörüngesel değirmende, bir birine ters yönde olan iki hareket vardır. Birincisinde, yörüngesel değirmenin gövdeleri (4 adet), merkezi bir eksen etrafında tıpkı gezegenlerin güneş etrafındaki dönüşü gibi döner. Bu hareketi sayesinde merkez eksenini boyunca santrifuj alanı oluşur. İkinci harekette ise değirmen gövdeleri kendi eksenleri etrafında dönmektedir (Şekil 3.9). Dolayısıyla yörüngesel değirmen, yüksek dereceli bir yerçekimi alanında çalışmaktadır. Ayrıca, yüksek santrifuj alanının da etkisiyle değirmen içerisinde çok yüksek enerji açığa çıkmaktadır. Bu yüzden, yörüngesel bir değirmen ile klasik bilyalı değirmenlere göre daha kısa sürede çok ince boyutlu malzeme elde etmek mümkündür.

Günümüzde karıştırmalı değirmenin kullanıldığı her alanda yörüngesel değirmen kullanılabilirliği olanaklı gözükmektedir. Ancak, karıştırmalı değirmenlere göre öğütme maliyeti daha yüksek olup, mekanik aksamalarında sık sık problem yaşanmaktadır (Sverak 2007). Şekil 3.9’da kısmen yörüngesel değirmenin çalışma prensibi ile çalışan elektro hidrolik değirmen gösterilmiştir. Bu değirmen tipinde, öğütücü silindirlere bir mil etrafında hareket etmekte ve öğütme kabuğu arasındaki malzemeyi ezerek ufalamaktadırlar.



Yörüngesel değirmen

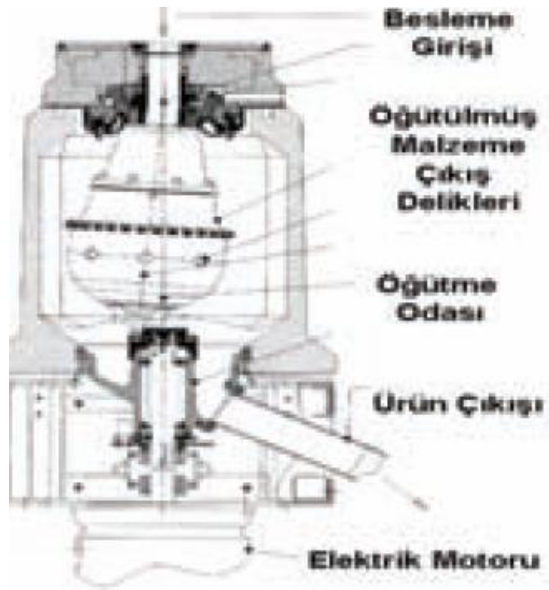


Elektro hidrolik değirmen

Şekil 3.9 Yörüngesel değirmen ve elektro hidrolik değirmenin görünüşü.

3.4.9 Sarkaç Değirmen

En bilinen sarkaç değirmen tipi, yüksek yoğunluklu, yarıküresel öğütme odalı Hikom değirmenidir. Hikom değirmeninde, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi öğütme odası askıda tutulmakta ve kendi eksenini etrafında ivmeli bir hareketle 600-800 d/d'lık bir hızla döndürülmektedir.



Şekil 3.10 Hikom değirmeninin çalışma prensibi ve kesit görüntüsü (Hacıfazlıoğlu 2009).

İçerisinde bulunan bilyalar yardımıyla taneler ufalanmakta ve öğütme odası üzerinde bulunan deliklerden öğütülmüş ürün dışarı çıkmaktadır. Daha sonra bu ürün separatörden geçirilmekte ve ince kısmından ayrılmaktadır. Bu değirmen tipinde kimberlit gibi çok sert malzeme öğütülebileceği gibi, kireç ve talk gibi çok yumuşak malzemeler de etkili bir şekilde öğütülebilmektedir. Diğer değirmen tipleri ile karşılaştırıldığında %31 ile %70 arasında bir enerji tasarrufu sağladığı çeşitli çalışmalarda iddia edilmektedir (Braun vd. 2002).

3.4.10 Halkalı Değirmen

Halkalı değirmenler bilezikli değirmen olarak da adlandırılmaktadır. Genellikle laboratuvar ölçeğinde kullanılan bu tip değirmenlerde, iç içe geçmiş halkalar bulunmaktadır (Şekil 3.11). Bu halkalar arasında yer alan malzeme, halkaların şaseler üzerindeki hareketi ile ezilmekte ve kısa sürede ufalanarak çok ince boyuta getirilebilmektedir. Kapasiteleri oldukça düşük ve endüstriyel ölçekte kullanımı oldukça zordur.

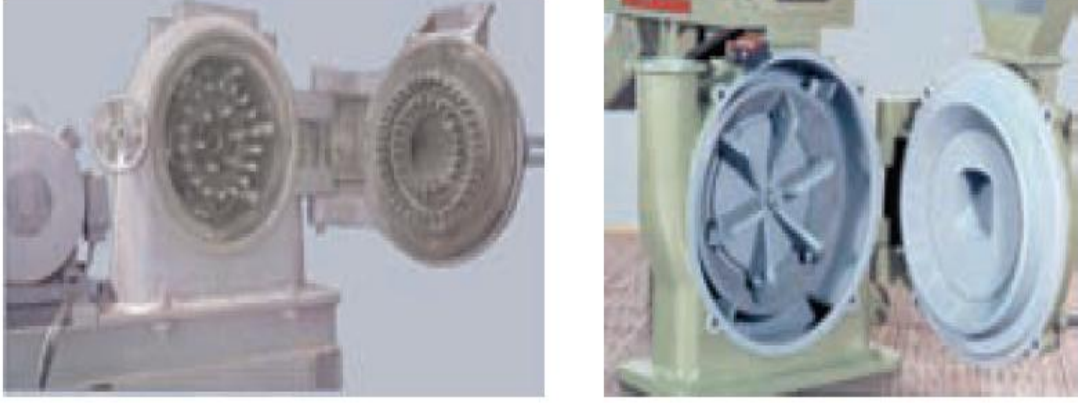


Şekil 3.11 Halkalı değirmenin görünüşü.

3.4.11 Çivili Değirmen

Çivili değirmenler, maksimum besleme boyutu 30-40 mm olan, kuru veya az nemli malzemenin 100 mikron'a kadar yüksek kapasiteyle öğütülmesinde kullanılır. Genellikle kimyevi ve gıda maddelerinin öğütülmesinde tercih edilmektedir.

Öğütme, yüksek hızda dönen çivili gövdenin tanelere uyguladığı kesme kuvvetleri ile gerçekleşir (Şekil 3.12). Saatlik kapasiteleri 5 ton'a kadar çıkabilmektedir. Yalnızca çivilerin bulunduğu rotorun hareket ettirilmesi ile önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığı belirtilmektedir.



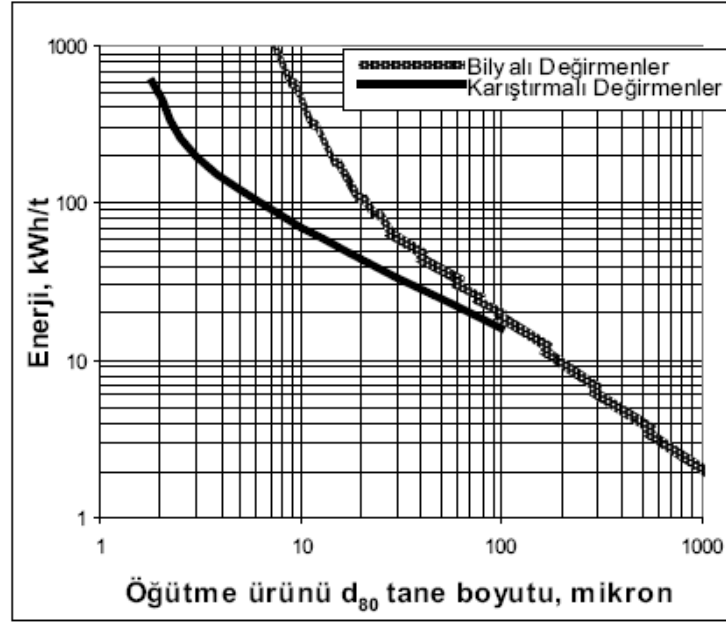
Şekil 3.12 Çeşitli çivili değirmen şekilleri.

3.4.12 Karıştırmalı Değirmen

Karıştırmalı değirmenler ince öğütme yapan cihazlara göre kolay işletim, basit konstrüksiyon, yüksek BKO, malzemenin öğütme ortamı tarafından az kirlenmesi ve düşük enerji sarfıyatı yönünden son yıllarda oldukça büyük önem kazanmıştır. Dar boyut grubunda ürün istenen endüstri alanlarında tercih edilmektedir (Miranda and Yaeger 1998, Wang and Forssberg 2000). Mikronize malzeme üretiminde çok etkili olduğundan dolayı; mineral, seramik, metalurji, elektronik, kimya, boya, ilaç ve kömür endüstrilerinde kullanılmaktadır. Cevher hazırlama sektöründe de karıştırmalı değirmenler, ince boyutlu ürünlerin hazırlamasında tercih edilmektedir.

Gelişen teknoloji ile beraber plastik, seramik, boya, gıda ve kozmetik gibi farklı endüstri kollarında ince (<100 µm), çok ince (<10 µm) veya süper ince (<1 µm) olarak adlandırılan boyutlardaki malzemeye olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

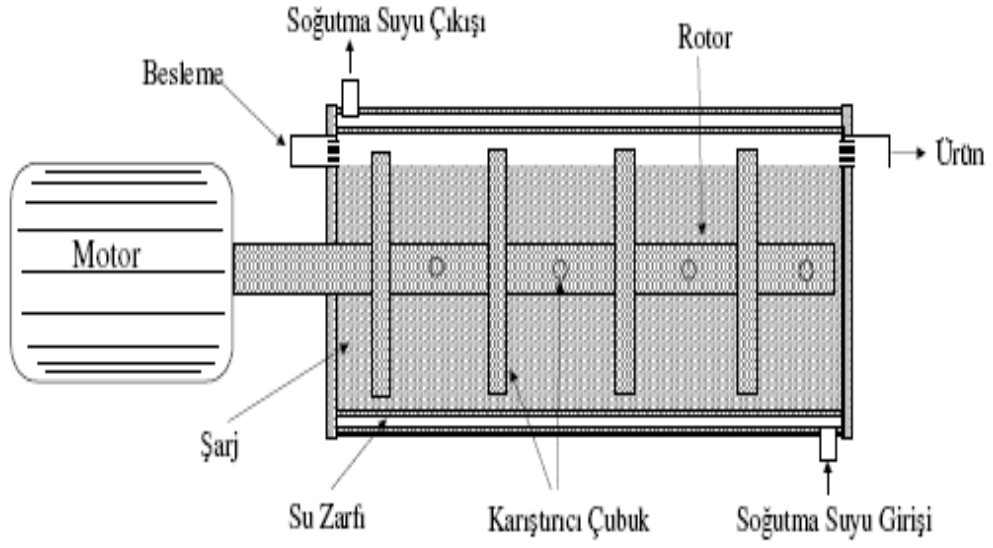
Karıştırmalı değirmen içerisinde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle enerji tüketimi, tamburlu ve bilyalı değirmenlerle karşılaştırıldığında oldukça düşük seviyede kalmaktadır (Wang and Forssberg 2007). Şekil 3.13'te Karıştırmalı ile bilyalı değirmenlerde tane boyutu ile enerji tüketimi değişimi grafiğinde, bu fark görülmektedir.



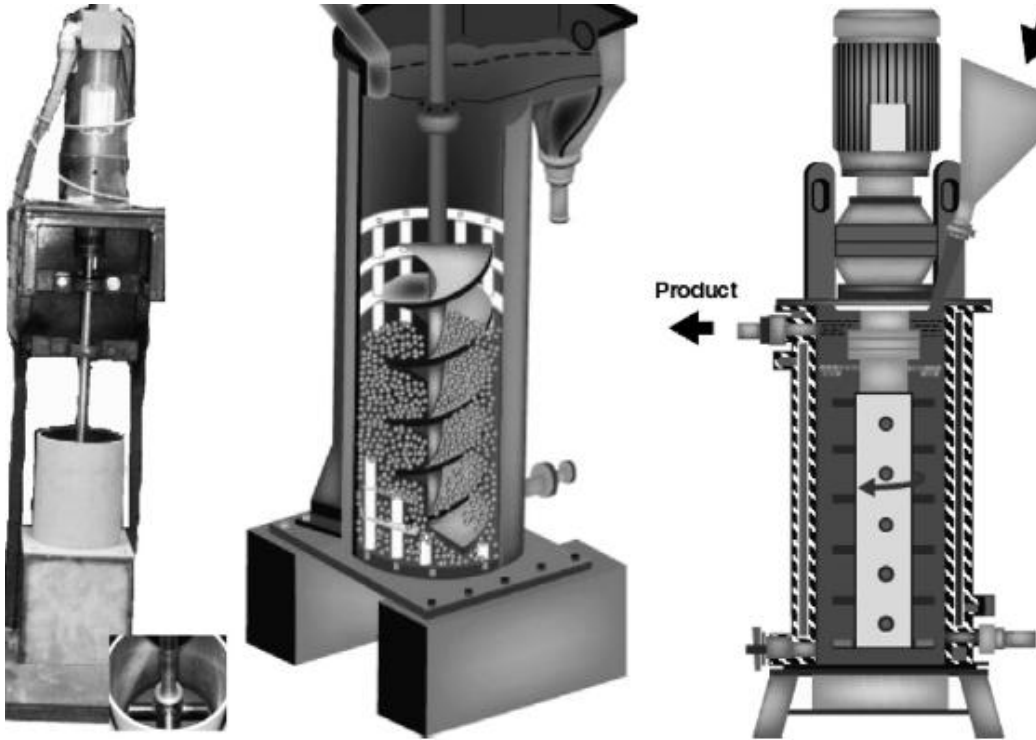
Şekil 3.13 Karıştırmalı ve bilyalı değirmenlerde tane boyutu ile enerji tüketimi değişimi (Jankovic 2003).

Karıştırmalı değirmen, sabit bir silindirik yapı içerisinde silindir ekseninde dönen bir rotordan oluşmaktadır (Şekil 3.14). Rotor üzerine belirli aralıklarla yerleştirilmiş çubukların yardımıyla silindiri dolduran ortamı hareket ettirilerek öğütme yapılmaktadır. Çubuklu ve bilyalı değirmenlerde tambur hareket ettirilirken, karıştırmalı değirmenlerde yalnızca bir karıştırıcı yardımı ile ortam hareket ettirilmektedir.

Karıştırma ünitesi diskli, pinli ve halkalı olmak üzere üç tipten oluşur (Şekil 3.15). Bu değirmenler yatay veya dikey olarak kullanılabilirler gibi, yaş veya kuru olarak da farklı cevherlerin öğütülmesinde kullanılmaktadır (Tuzun et al. 1995, Kwade 1999, Bilgili et al. 2004, Jankovic and Sinclair 2006, Sinnott et al. 2006, Ding et al. 2007).



Şekil 3.14 Yatay bir karıştırımlı değirmenin şematik görünüşü (Pilevneli 2003).



Şekil 3.15 Karıştırımlı değirmende kullanılan karıştırma ünitesi şekilleri (Jankovic 2006).

Öğütme esnasında öğütücü ortam genelde seramik, çelik, bazen de cam, alüminyum gibi uygulama alanına bağlı değişik malzemelerden imal edilen bilyalardır. Karıştırmalı değirmende kullanılan kuvvetler bilyalı ve çubuklu gibi aktarılan ortamlarla çalışan değirmenlerden farklıdır. Bu tip değirmenlerde öğütme, büyük ölçüde çarpma ve basınçla, kısmen de aşındırma ve kesme kuvvetleri ile olurken, karıştırmalı değirmenlerde aşındırma ve kesme kuvvetleri çarpmayla birlikte ağırlıklı yer almaktadır (Wang and Forssberg 2000).

Bilyalı değirmenlerde bilyalara ufalama etkisini sağlayacak kinetik enerji kazandırmak daha kolaydır. Çünkü öğütücü ortam boyutu oldukça iridir. Fakat karıştırmalı değirmendeki ortam boyutu oldukça ufaktır. Örneğin, bilyalı değirmenlerde kullanılan bilya ebatları 50-20 mm arasındadır. Karıştırmalı değirmenlerde kullanılan boncuk boyutu 2,5 mm ve ortam özgül ağırlığı aynı kabul edilirse; ortamın aynı hızla hareket ettiğinde hacim farkından dolayı kazanacağı momentum 50-20 mm'lik bilyalar için 2,5 mm bilyaya göre sırasıyla 8000 ve 512 kat fazla olması makul bir beklentidir. Karıştırmalı değirmendeki boncukların, bilyalı değirmenlerdeki ortamın hareketi ve kendi ağırlığı ile kazandığı kinetik güce erişebilmesi için hızının yeterli ölçüde artırılması gerekmektedir.

Karıştırmalı değirmen ile yapılan araştırmalarda genelde incelenen etkiler:

- Karıştırma hızı,
- Öğütücü boyutu ve cinsi,
- Öğütücü yoğunluğu,
- Pülp katı oranı veya pülp yoğunluğu (yaş öğütmelerde),
- Beslenen cevher boyutu,
- Sürekli sistemde pülpün akış debisi ya da kapasite,
- Kesikli sistemde öğütme süresi,
- Karıştırıcı sistem tasarımı (tip, şekil),
- Dikey çalışan sistemlerde yerçekiminin etkisi,
- Dağıtıcı katkılarının tipi ve miktarıdır.

Karıştırma yapan rotorun hızı 3-18 m/s aralığında değişebilmektedir. Öğütücü boyutları uygulamaya göre 0,2 ile 8 mm arasında değişebilir. 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 and Gao 2000).

Değirmene beslenen tanelerin kırılabilmesi için tanenin iki bilya veya bilya ile değirmen duvarları arasında yakalanması ve bu çarpışmalarda açığa çıkan enerji yoğunluğunun taneleri kıracak kadar yüksek olması gerekmektedir (Kwade 1999).

Karıştırmalı değirmenlerin ilk çalışmalarında kaolin, mika, profilit, talk, mermer, barit ve florit gibi endüstriyel hammaddelerin öğütülmesinin yanı sıra kömür, kireçtaşı, kalkopirit konsantresi, pirit, boya, demir oksit vs. gibi diğer organik malzeme ve minerallere de uygulanmaktadır. Bu değirmende yapılan öğütmede spesifik enerji sarfiyatı da bilyalı değirmenlere oranla % 60 daha az olabilmektedir. Öğütme inceliğine göre cevherin kuru tonu başına harcanan enerji 10-2000 kwh/t olmaktadır (Orumwense and Forsberg 1992).

Karmaşıklaşan cevher yapısının ince boyutta serbestleşme gerektirmesinden ötürü çok ince öğütme kaçınılmaz hale gelmiştir ve böylelikle yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmenler imal edilmiştir. Son yıllarda en yüksek kapasiteli karıştırmalı değirmen Avustralya Mount Isa madeninde Isamill adı altında, Mount Isa Mines Ltd. tarafından kurulmuştur. Cihaz 3000 litre net hacim, sekiz karıştırıcı disk, 10 m/s üstünde disk hızı, % 70-80 bilya doluluk oranı, %40-50 pülp katı oranı, 180-240 litre/d pülp çalışma debisi ve 1120 kW güçte çalıştırılmaktadır (Young and Gao 2000, Weller et al. 2000).

Karıştırmalı değirmenlerde öğütme işlemi üzerinde etkin olan değişkenler, tasarım ve işlem değişkenleri olmak üzere iki ana grup altında toplanabilir. Tasarım değişkenleri; boy/çap oranı karıştırıcı tipi, şaft üzerinde bulunan disk veya çubuklar arasındaki uzaklık, disk veya çubukların boyutları ve şaft üzerindeki konumları vb. gibi tasarım ile ilgili değişkenlerden oluşmaktadır. Tasarımlardaki bu farklılıklar değirmen içinde oluşan akış profillerini dolayısıyla bilya hareketlerini optimize etmeyi amaçlamaktadır (Tüzün 1994) İşlem değişkenleri ise karıştırma hızını, bilya yoğunluğu, öğütme süresi, bilya boyutu, bilya doluluk oranıdır.

Karıştırma hızı öğütmeyi etkileyen en önemli etkidir. Karıştırma hızı arttıkça, kırılma hızı da artmakta ve ürün boyutu, buna orantılı olarak ekonomik ve verimli bir şekilde mikronize boyuta inmektedir. Ayrıca, boyut dağılımı da karıştırma hızıyla incelmekte ve daha dar boyut aralığına sahip ürünler elde edilmektedir (Wang and Forssberg 2000). En verimli karıştırma hızı, bilyaların taneler arası kuvvetleri yenmeye başladığında elde edilmektedir. Bu hız aşıldığında, fazla olan enerjinin, elde edilen inceliğe ya da verime bir katkısı olmadığı gibi aşırı ısınmaya neden olabileceği belirtilmektedir (Fadhel and Frances 2001).

Öğütücü boyutu da öğütme için önemli bir parametredir. Bilya boyutu arttıkça kırılma hızı da artmaktadır. Bilya boyutunun en verimli olduğu bir tane boyutu vardır. Bu ideal tane boyutundan daha büyük taneler için kırılma hızında düşme meydana gelir. Kwade et al. (1996), kireçtaşı ($d_{50}=60 \mu\text{m}$) öğütmesinde 97 ve 219 μm boyutlu cam bilyaların hiç öğütme yapmadığını; 838 μm bilyaların en verimli öğütme yaptığını ve bundan daha iri (1090-4000 μm) bilyaların daha verimsiz öğütme yaptığını göstermiştir.

Gao et al (2000) tarafından yapılan çalışmada ise iki ayrı malzemedan hazırlanarak elde edilen iki ayrı boyut gruplu (-1,7+0,42 mm ve -0,85+0,3 mm) bakır cürufu ve ağır ortam tesisi artığı bilya yerine kullanılmıştır. 5 μm 'dan daha iri ürün için ince boyutlu, 5 μm 'dan ince ürün içinse iri boyutlu bilyaların daha verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Başka bir çalışmada ise 65 μm (d_{80}) boyutlu Zn kaba konsantresinin 4 litre hacim ve 7,9 m/s çevresel hızla bir karıştırmalı değirmende öğütülmesinde -1+0,6 mm, -1+0,8 mm ve -2,5+1,6 mm boyutlu seramik bilyalar kullanmışlardır. Bu bilya boyut gruplarından -1+0,8 mm boyutlu bilyalar, 3-10 μm arası ürün (d_{80}) için diğerlerine oranla 5-10 kWh/t kazanç sağlamıştır (Weller et al. 2000).

Öğütücü ortam türünün etkisi üzerine yapılan çalışmalarda cam (silis), çelik, alüminyum, zirkon-silis (Zr-Si) karışımı ve seramik boncuklar kullanılmıştır. Genelde boncuğun özgül ağırlığı arttıkça kırılma hızı da artmaktadır. Daha yoğun boncuk daha kısa sürede öğütme yapmaktadır (Mankosa et al. 1986). Karıştırmalı değirmende en önemli olumsuzluk, değirmen içindeki yüksek hıza bağlı olarak öğütücü ortam ve içindeki aşınmanın fazlalığıdır. Karıştırma hızı arttıkça, aşınma artmaktadır. Öğütücü ortam da kırılma hızı arttıkça, aşınma artmakta ve bazen kırılmalar meydana gelmektedir.

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Marfam Mermer'in mermer kesme atölyesinden alınan mermer atıkları Bülent Ecevit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü Yakup Keskin Cevher Hazırlama Laboratuvarına getirilerek, karıştırmalı değirmende öğütmede etkili olan parametreler incelenmiştir. Mermer atıklarının özellikleri belirlenmiş ve endüstride kullanılabilirliğine ilişkin araştırma yapılmıştır.

4.1 KULLANILAN MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANITILMASI

4.1.1 İnceleme Alanının Konumu

Eskişehir il sınırları içerisinde kalan inceleme alanı; Eskişehir'e 130 km, Sivrihisar ilçesine 30 km uzaklıktadır (Şekil 4.1). Saha Karacaören Köyü mevkinde olup, Eskişehir (Sivrihisar)-Konya (Çeltik) karayolundan ulaşım sağlanmaktadır. İncelenecek olan mermerin pazar durumu oldukça iyidir. Fayans olarak fabrikada kesildikten sonra, Amerika, Kanada, Avustralya, Fransa, Suudi Arabistan'a satışı yapılmaktadır. Blok olarak Çin'e ve Hindistan'a gönderilmektedir.

Üretim yöntemi açık işletme mermer ocak işletmesi olup, elmas tel kesme ile kesilen bloklar titano ile devrilmektedir. Devrilen bloklar sayalama makineleri ile sayalanıp küçültülmekte ve yükleyiciler ile kaldırılıp stok alanına taşınmaktadır. Ocakta şu anda dördüncü basamakta çalışılmaktadır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Çalışma alanının yer bulduru haritası.



Şekil 4.2 Ocak sahasının resmi.

4.1.2 Numunenin Kimyasal Özellikleri

Mermer atıklarının kimyasal özelliklerini belirlemek için tane boyutu 0,1 mm altında olan numuneler hazırlanmıştır. Karbonat dışı minerallerin yaygın olmadığı anlaşılan atıkların kimyasal bileşimleri XRF yöntemiyle Spectro Xepos marka cihaz ile belirlenmiştir (Çizelge 4.1). Kızdırma kaybı da BEÜ laboratuvarında 1050 ° C'lik fırın kullanılarak hesaplanmıştır. Numune, çizelgede görüldüğü gibi yüksek saflığa (% 98,93 CaCO₃) ve yüksek beyazlığa sahip, doğal kalsiyum karbonattır.

Çizelge 4.1 Atık mermer numunelerinin kimyasal analiz sonuçları.

Kimyasal Analizler	(%)
CaO	55,40
Fe ₂ O ₃	0,001
Na ₂ O	0,014
MgO	0,900
Al ₂ O ₃	0,002
SiO ₂	0,034
Diğer	0,090
Kızdırma Kaybı	43,81
HCl'de çözülmeyen	0,40

4.2 KIRMA DENEYLERİ

Marfam'ın fabrikasından alınan 100 kg paledyen atıklar, ilk olarak çeneli kırıcıda kırılmıştır. Daha sonra numune 3350 µm boyutu altına konik kırıcı ile kontrollü olarak kırılmış ve boyut analizi yapılmıştır (Çizelge 4.2).

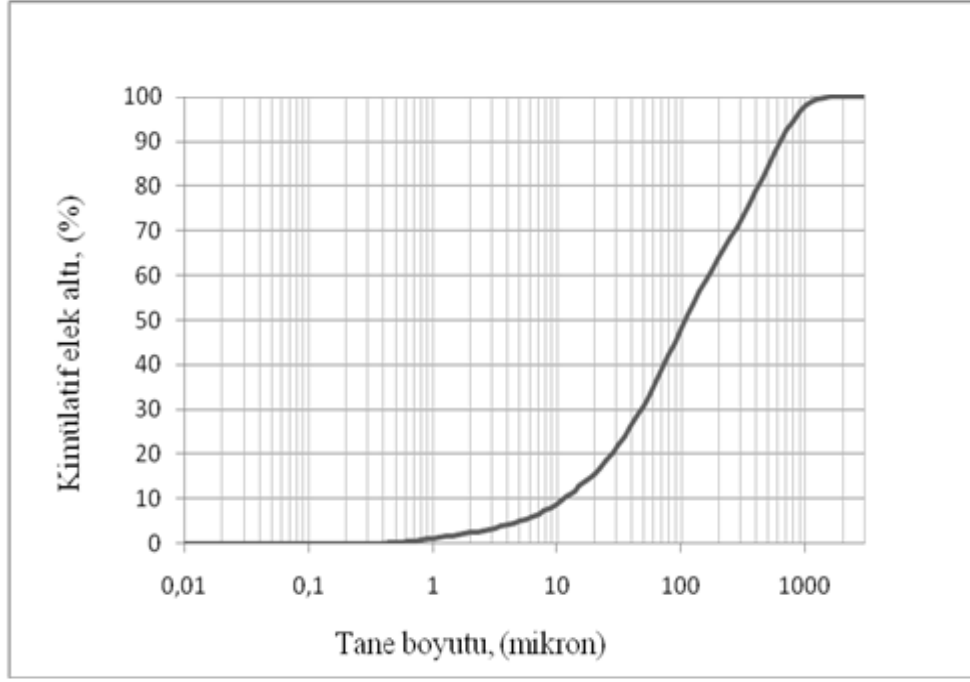
Çizelge 4.2 Konik kırıcıdan çıkan numunenin elek analiz sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	Ağırlık (%)	E.A. (%)	E.Ü. (%)
-3350 + 2000	32,89	100,00	32,89
-2000 + 1000	26,18	67,11	59,07
-1000 + 500	6,85	40,93	65,92
-500 + 250	7,17	34,08	73,09
-25 + 106	11,96	26,91	85,05
-106 + 53	5,77	14,95	90,82
-53 + 45	3,61	9,18	94,43
-45	5,57	5,57	100,00
TOPLAM	100,00		

Numune son olarak merdaneli kırıcıda kırılarak, karıştırmalı değirmene beslenecek boyuta hazırlanmıştır (Çizelge 4.3). Şekil 4.3'te boyut dağılımı gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 Merdaneli kırıcıdan çıkan numunenin elek analiz sonuçları.

Elek Boyutu (mikron)	Ağırlık (%)	E.A. (%)	E.Ü. (%)
-2000 + 850	4,21	100,00	4,21
-850 + 500	11,43	95,79	15,64
-500 + 250	16,03	84,36	31,67
-250 + 106	18,88	68,33	50,55
-106 + 53	17,29	49,45	67,84
-53 + 45	3,57	32,16	71,41
-45 + 38	3,36	28,59	74,77
-38	25,23	25,23	100,00
TOPLAM	100		



Şekil 4.3 Merdaneli kırıcıdan çıkan numunenin elek altı eğrisi.

Numuneye ait tane boyut dağılımı grafiğinde görüldüğü gibi, malzemenin tamamı (d_{100}) 1mm altındadır. Ortalama tane iriliği (d_{50}) ise yaklaşık $108 \mu\text{m}$ 'dir.

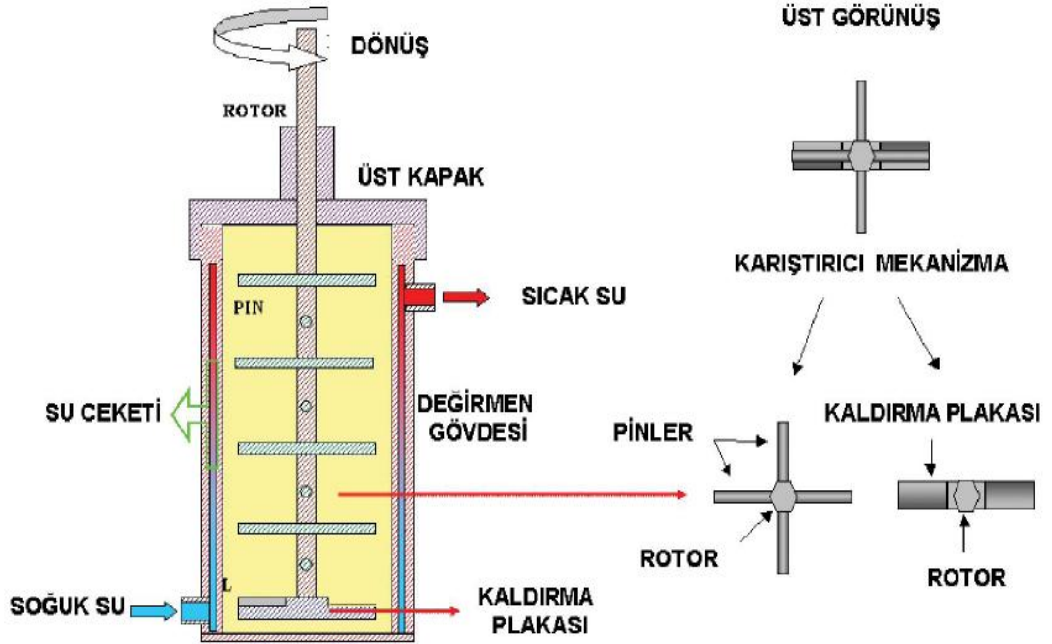
4.3 ÖĞÜTME DENEYLERİ VE DENEYSEL SONUÇLAR

Öğütme deneylerinde, Bülent Ecevit Üniversitesi Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan laboratuvar ölçekli karıştırırmalı değirmen deney düzeneği kullanılmıştır. Deney seti; karıştırırmalı değirmen gövdesi, AC motor, inverter ve bilgisayar olmak üzere dört ana unsurdan oluşmaktadır. Şekil 4.4'te değirmenin bütün ekipmanları karıştırıcı mil ve pinler, gövde, motor ve bilgisayar görülmektedir. Şekil 4.5'te ise karıştırırmalı değirmenin şematik görünümü gösterilmiştir (Hacıfazlıoğlu vd. 2008).

Yerel olanaklarla imal ettirilen karıştırırmalı değirmen, 110 mm çapında ve 200 mm yüksekliğinde silindirik hacimli bir gövdeye sahiptir. Karıştırıcı mil altıgen kesitlidir. 10 mm çapında ve 102 mm boyutunda 8 adet karıştırıcı çubuk 20 mm aralıklarla mil üzerine yerleştirilmiştir. Karıştırıcı kısmı bir kaplin ile tahrik motoruna bağlıdır. Değirmenin toplam iç hacmi 1,94 lt olup, karıştırıcı kısım düştükten sonra kullanılabilir hacmi ise 1,75 lt'dir.



Şekil 4.4 Karıştırılmalı değirmen.



Şekil 4.5 Karıştırılmalı değirmenin şematik görünümü (Hacıfazlıoğlu vd. 2008).

Değirmen, 2,2 kWh'lik maksimum devri 1500 d/d olan motorla karıştırma yapmaktadır. Farklı hızlarda deney yapabilmek için Siemens Midi Master 1500 model sürücü (frekans inverteri) motora bağlanmıştır ve bu sürücü hem elle hem de bilgisayar ile kontrol edilebilmektedir.

Karıştırmalı değirmende öğütücü ortam olarak -3,00+2,00 mm (ortalama 2,5 mm) çaplı, yoğunluğu 4,3 g/cm³ olan zirkon bilyalar kullanılmıştır. Üründe demir kirlenmesi olmaması için zirkon tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan öğütücü ortam miktarı 2270 gram olup, sıkılanmış hacmi 880 cc gelmektedir ve bu miktar gövdede kullanılacak hacmin %50'sini kaplamaktadır. Literatürde öğütücü ortam bilya boyutu ile öğütülecek malzeme boyutu arasında 20:1 oranı (bilya boyutu/malzeme boyutu) uygun olduğu ifade edilmektedir. Bilya boyutu ortalama 2,5 mm olarak seçilmiştir. Bilyalar Asil Kimya firmasından temin edilmiş olup fiziksel özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Bilyaların görünüşü Şekil 4.6'da sunulmaktadır.

Çizelge 4.4 Öğütücü ortamın fiziksel özellikleri.

Bileşimi	Özgül Ağırlığı (kg/m ³)	Kaba Yoğunluğu (kg/m ³)	Sertliği
ZrSiO ₄	>4000	>2600	>900 Hv



Şekil 4.6 Öğütücü zirkon bilyalar.

Doluluk oranı değirmenin yarısının bilya ve boşluklarında numune ile doldurulduğu orandır. Bu miktar %100 doluluk oranı olarak adlandırılmıştır. Bilyalar arası boşluk %42 ve mermer artığının yığın yoğunluğu da $1,53 \text{ g/cm}^3$ hesaplanmıştır. Doluluk oranının belirlenmesi için mezürle yapılan ölçümler sonucu 2270 gram boncuk arasındaki boşlukların tam olarak (%100) dolabilmesi için 565,5 gram konulması gerektiği belirlenmiştir. Diğer yüzde miktarlar bu miktara oranla hesaplanmıştır (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Değirmen gövdesini doluluk oranına göre besleme miktarları.

Doluluk (%)	Besleme Miktarı (gram)
60	339,3
80	452,4
100	565,5
140	791,7

Kesikli değirmende öğütme süresi, karıştırma hızı ve doluluk oranı olmak üzere üç parametre incelenmiştir. Her motor devri, her doluluk oranı ve her öğütme süresi için farklı deneyler yapılmıştır. Tane boyutu analizlerinde ise İnönü Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Laboratuvarında bulunan “Malvern Mastersizer 2000” cihazı kullanılmıştır. Deneyler yaş olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de söz konusu cihazın görüntüsü verilmiştir. Ölçümler üç kere yapılmış ve ortalama değerleri alınmıştır.



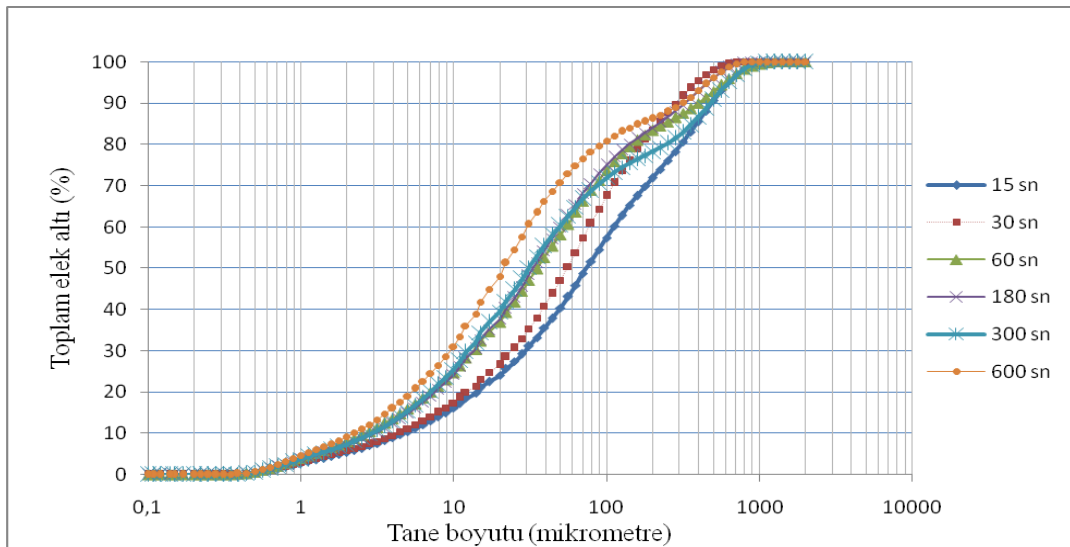
Şekil 4.7 Malvern Mastersizer 2000 cihazının görünüşü.

4.3.1 Karıştırılmal Değirmende Karıştırma Hızının Ürün Boyutuna Etkisi

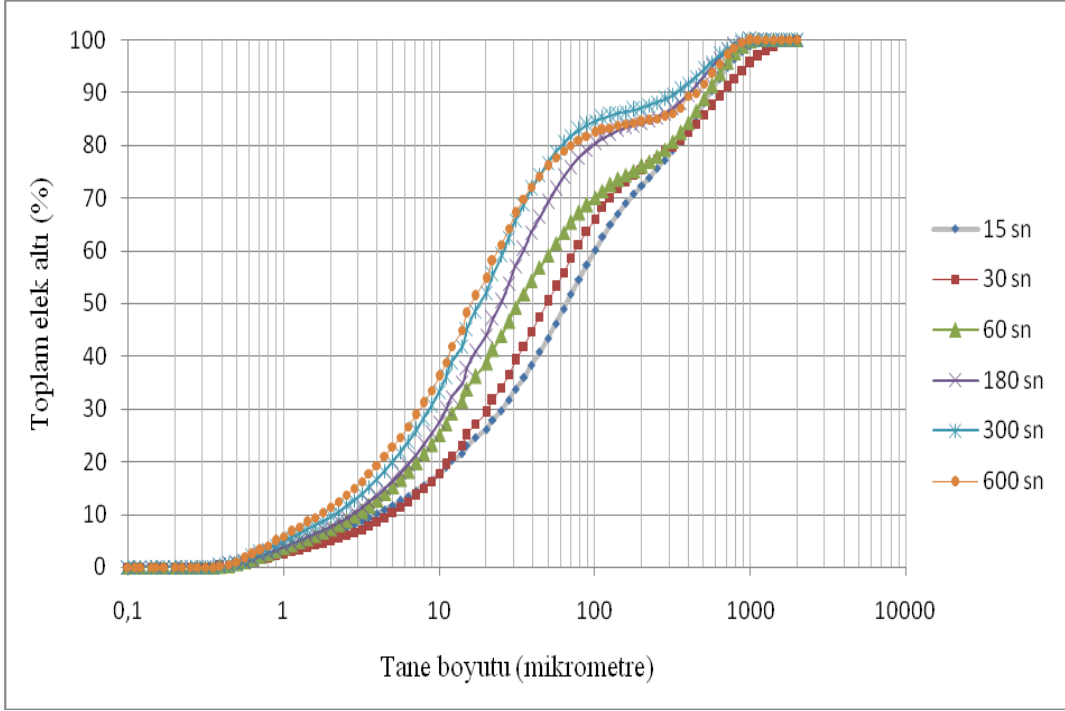
Karıştırma hızının değişimi motor gücü değiştirilerek sağlanmıştır. %100 doluluk oranında; 360 dev/dk, 540 dev/dk, 720 dev/dk, 1080 dev/dk ve 1440 dev/dk olmak üzere 5 farklı karıştırma hızında çalışılmıştır. 15 sn, 30 sn, 60 sn, 180 sn, 300 sn ve 600 sn olmak üzere 6 farklı öğütme süresinde çalışılmış, her öğütme süresi sonunda alınan ürünlerin boyut dağılımları tespit edilmiştir. Aşağıda belirtilen koşullarda öğütme deneyleri yapılmıştır;

Kullanılan malzeme boyutu	: -850 μ m
Doluluk oranı	: %100
Malzeme miktarı	: 565,5 gr
Karıştırma hızı	: 360, 540, 720, 1080, 1440 dev/dk
Öğütücü ortam cinsi	: Zirkon bilya
Öğütücü ortam çapı	: -3,36 + 2,00 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 2270 gr
Öğütme süreleri	: 15, 30, 60, 180, 300 ve 600 sn

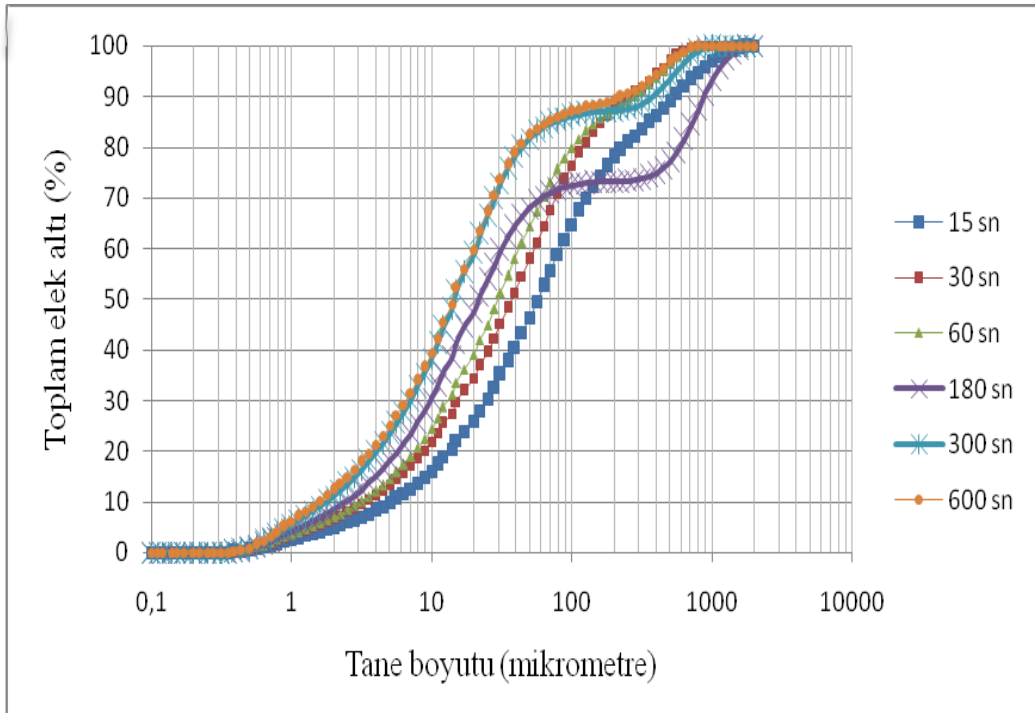
Laboratuar ölçekli karıştırılmal değirmende, ideal karıştırma hızının belirlenmesine yönelik olarak yukarıda verilen koşullarda yapılan deneylerden elde edilen ürünlerin boyut analizleri aşağıda Şekil 4.8-4.12’de verilmiştir.



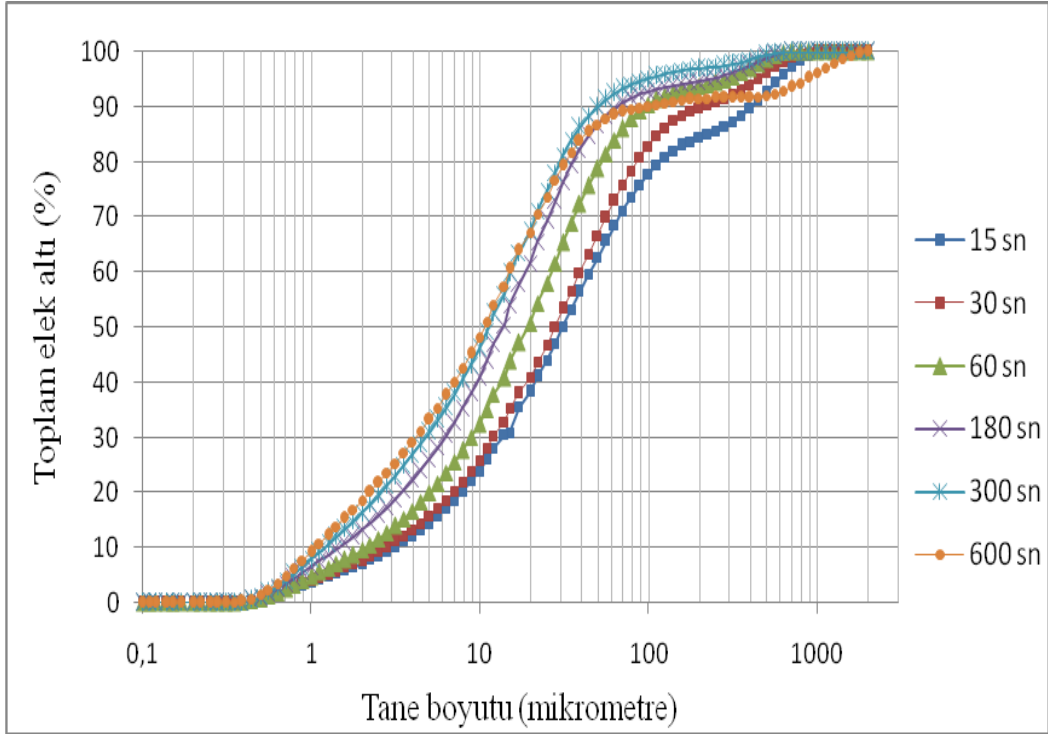
Şekil 4.8 360 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri.



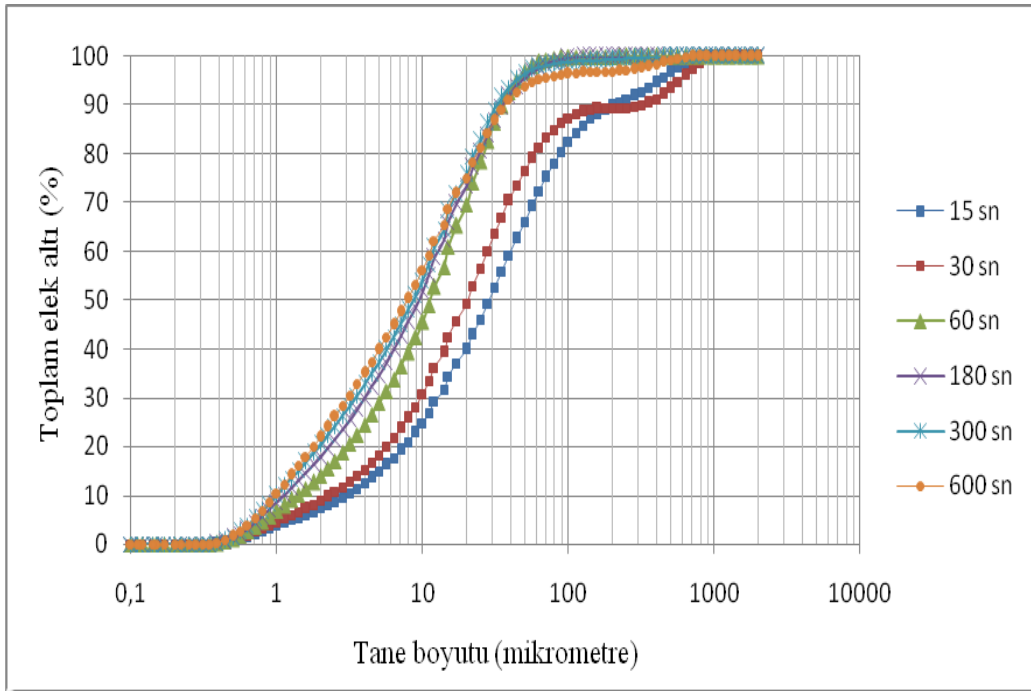
Şekil 4.9 540 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri.



Şekil 4.10 720 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri.

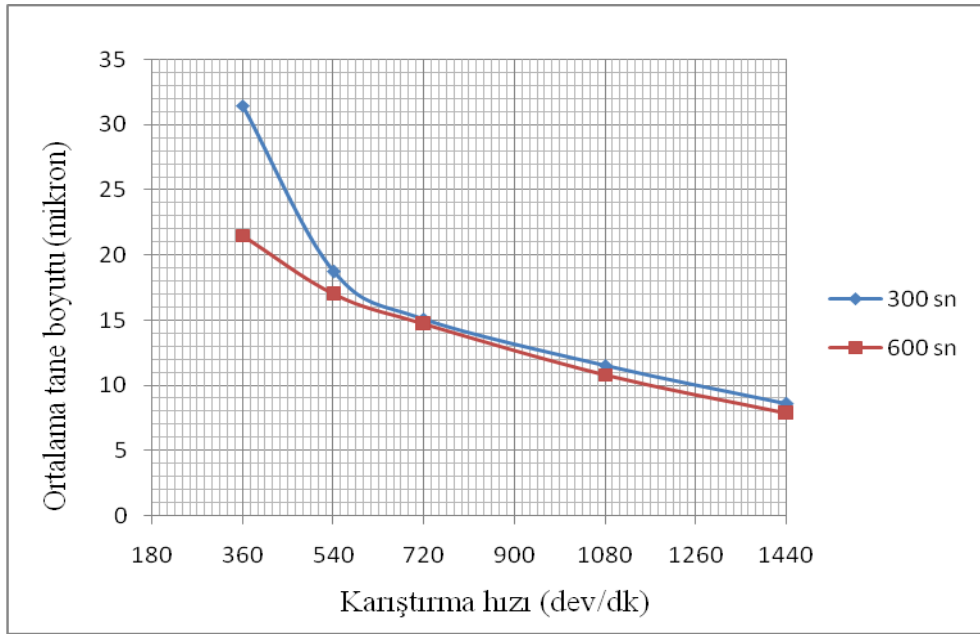


Şekil 4.11 1080 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri.



Şekil 4.12 1440 dev/dk karıştırma hızındaki elek altı eğrileri.

Karıştırma hızı ürün inceliğini ve enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yapılan deneyler sonunda karıştırma hızı arttıkça, kırılma hızının da arttığı ve ürün boyutunun mikronize boyuta indiği görülmüştür. Ayrıca karıştırma hızı artarken boyut dağılım eğrisi dikleşmektedir. Karıştırıcı hızının artması ile birlikte elde edilen ürünün d_{50} tane boyutu da incelmıştır. Örneğin 360 dev/dk da elde edilen ürünün d_{50} boyutu 20 mikron iken 1440 dev/dk da elde edilen ürünün d_{50} boyutu 7 mikron elde edilmiştir. Ayrıca hız arttıkça istenilen ürün tane boyutuna ulaşmak için gerekli olan sürenin azaldığı görülmüştür. Şekil 4.13'te 300 ve 600 saniyedeki, karıştırma hızı ve ortalama tane boyutu arasındaki ilişki gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 17 mikron ortalama tane boyutundan sonra 300 ve 600 saniyedeki öğütme sürelerinde alınan ürünlerin inceliği yaklaşık 1 mikrona düşmekte neredeyse öğütme gerçekleşmemektedir. Bunun nedeni ince boyuttaki tanelerin birbirine bağlanarak topaklar oluşturmasıdır.



Şekil 4.13 Karıştırma hızı ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki.

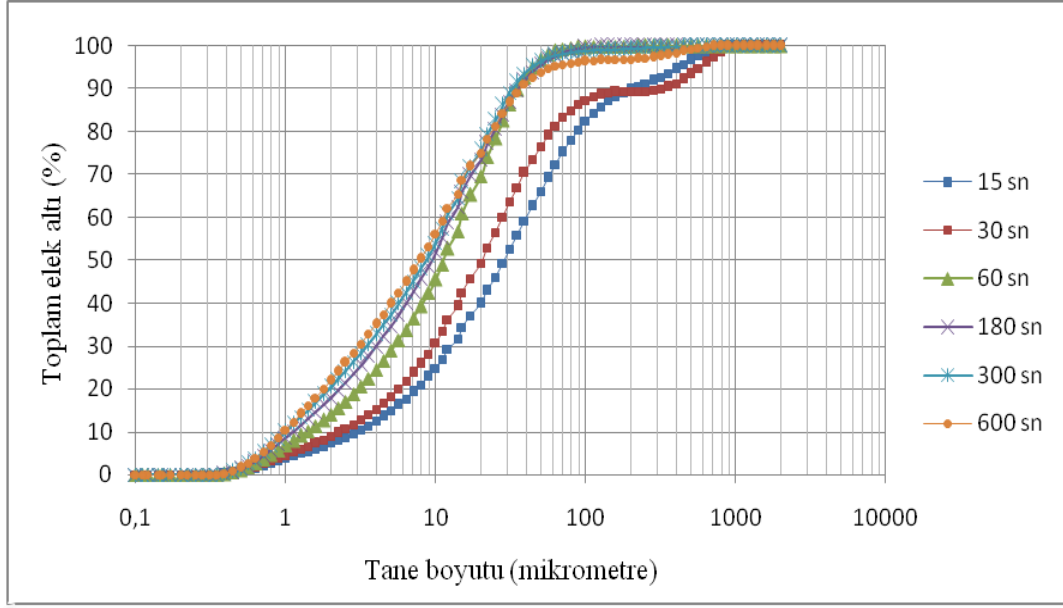
Çizelge 4.6'da bu yapılan deneylerde elde edilen ortalama tane boyutları verilmiştir. Çizelgeden ve karıştırma hızına bağlı grafiklerden de görüldüğü gibi, ortalama tane boyutu 20 mikron elde etmek için 1440 dev/dk'da 30 saniye veya 1080 dev/dk'da 60 saniye çalışma koşulunda öğütme yapmak gerekir. 15 mikron elde etmek için 720 dev/dk'da 300 saniyede; 10 mikron elde etmek için ise 1440 dev/dk'da 180 saniyede veya 1080 dev/dk'da 600 saniyede öğütülmelidir.

Çizelge 4.6 Karıştırma hızı ve öğütme süresine bağlı olarak elde edilen ürünün ortalama tane boyutu (mikron).

Öğütme süresi (sn)→ Karıştırma hızı (dev/dk)↓	15 saniye	30 saniye	60 saniye	180 saniye	300 saniye	600 saniye	1200 saniye
	360 dev/dk hızdaki d_{50} boyutu (mikron)	74,57	55,67	35,70	33,61	31,47	21,49
540 dev/dk hızdaki d_{50} boyutu (mikron)	66,04	49,56	32,87	24,83	18,73	17,00	14,36
720 dev/dk hızdaki d_{50} boyutu (mikron)	57,55	37,99	30,32	21,91	15,14	14,71	11,35
1080 dev/dk hızdaki d_{50} boyutu (mikron)	31,55	28,19	19,54	13,92	11,56	10,81	8,74
1440 dev/dk hızdaki d_{50} boyutu (mikron)	29,04	20,51	11,57	9,38	8,6	7,84	7,07

4.3.2 Karıştırma Değirmende Öğütme Süresinin Ürün Boyutuna Etkisi

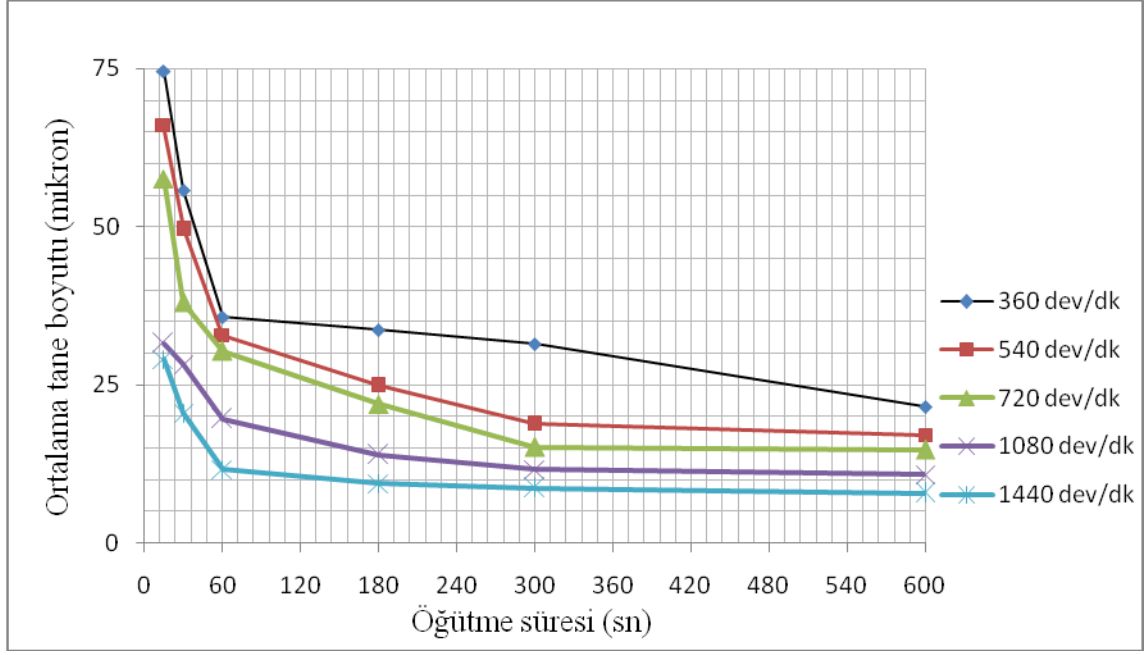
Öğütme süresinin tane boyut dağılımına ve ürün inceliğine etkisini ortaya koymak üzere deneyler yapılmıştır. Bunun için 15, 30, 60, 180, 300 ve 600 saniyede öğütme yapılmış ve gittikçe daha ince ürünler elde edilmiştir (Şekil 4.14). Karıştırma hızı 1440 dev/dk'dır.



Şekil 4.14 Öğütme süresinin tane boyut dağılımına etkisi.

Besleme d_{50} boyutu 108 mikron olan mermer atıklarının; 15 saniyelik öğütmede d_{50} 29 μm ürün elde edilirken, öğütme süresi 600 saniyeye çıktığında d_{50} 7,84 μm boyutunda ürün elde edilmiştir. Şekil 4.15'te farklı karıştırma hızları ile farklı öğütme sürelerinde elde edilen d_{50} arasındaki ilişki gösterilmektedir. Grafikte görüldüğü gibi 180 saniyenin üzerindeki öğütme sürelerinde öğütme verimi azalmaktadır.

Öğütme süresi arttıkça, elde edilen ürünlerin hemen hemen ortalama tane boyutu birbirine yakın olduğu ve ince boyuttaki tanelerin birbirine bağlanarak topaklar oluşturduğu görülmüştür. Bunun nedeni öğütme süresinin fazla olduğundan dolayı öğütme gövdesi ve malzemenin ısınmasından kaynaklanmıştır.



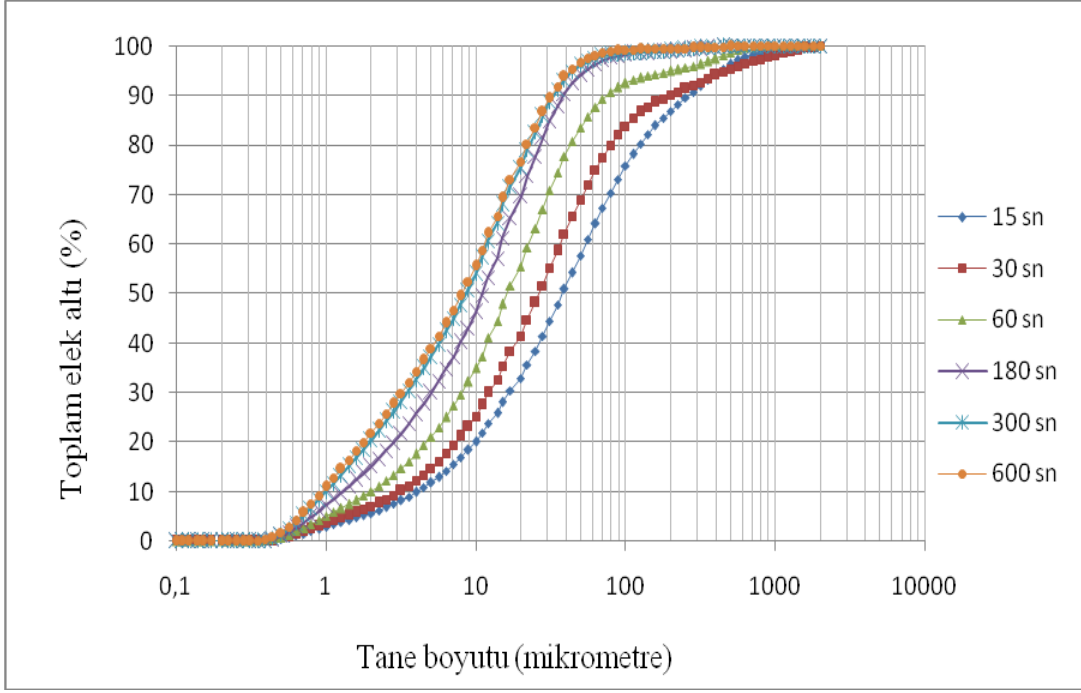
Şekil 4.15 Öğütme süresi ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki.

4.3.3 Karıştırmalı Değirmende Doluluk Oranının Ürün Boyutuna Etkisi

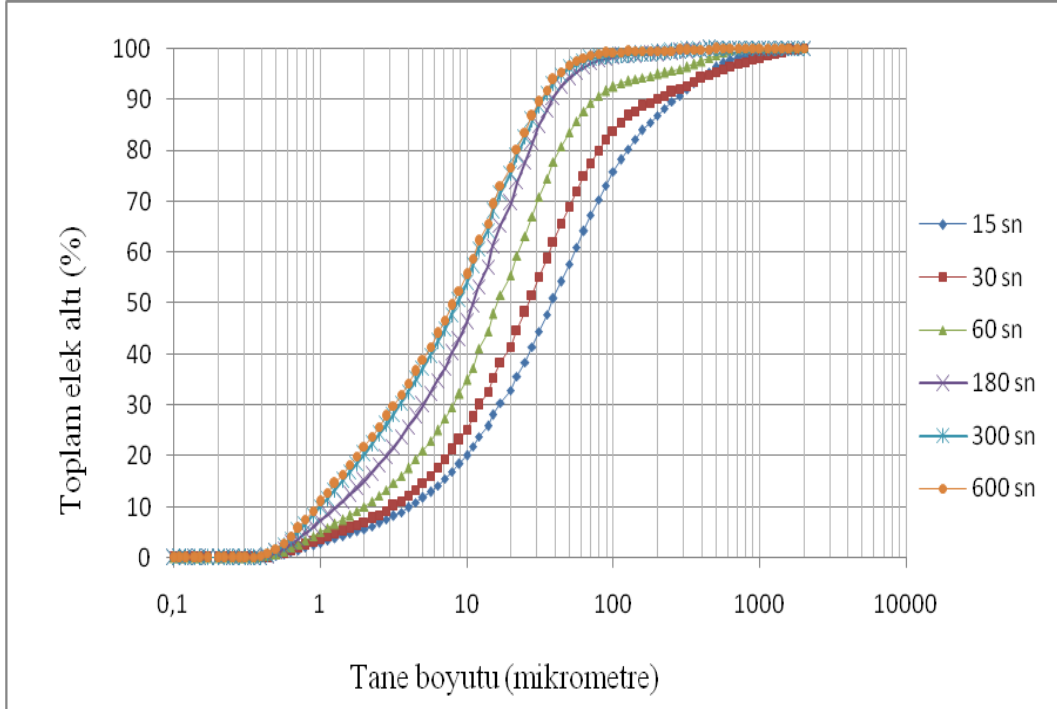
4 farklı doluluk oranlarında 6 farklı sürelerde öğütme yapılmıştır. 1080 dev/dk karıştırma hızında; %60, %80, %100 ve %140 doluluk oranlarında deneyler yapılmıştır. 15 sn, 30 sn, 60 sn, 180 sn, 300 sn ve 600 sn olmak üzere 6 farklı öğütme süresinde, doluluk oranının ürün boyutuna etkisi tespit edilmiştir (Şekil 4.16-4.19).

Aşağıda belirtilen koşullarda öğütme deneyleri yapılmıştır;

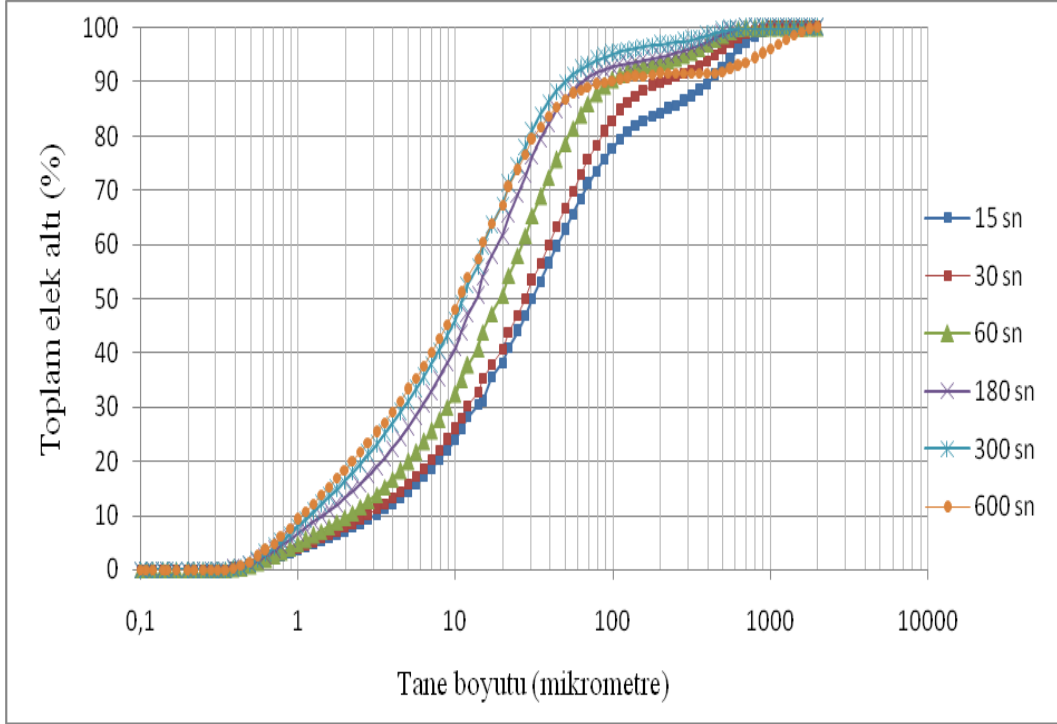
Kullanılan malzeme boyutu	: -850 μ m
Doluluk oranı	: %60, %80, %100 ve %140
Malzeme miktarı	: 393,3 gr, 452,4 gr, 565,5 gr ve 791,7 gr
Karıştırma hızı	: 1080 dev/dk
Öğütücü ortam cinsi	: Zirkon bilya
Öğütücü ortam çapı	: -3,36 + 2,00 mm
Öğütücü ortam miktarı	: 2270 gr
Öğütme süreleri	: 15, 30, 60, 180, 300 ve 600 sn



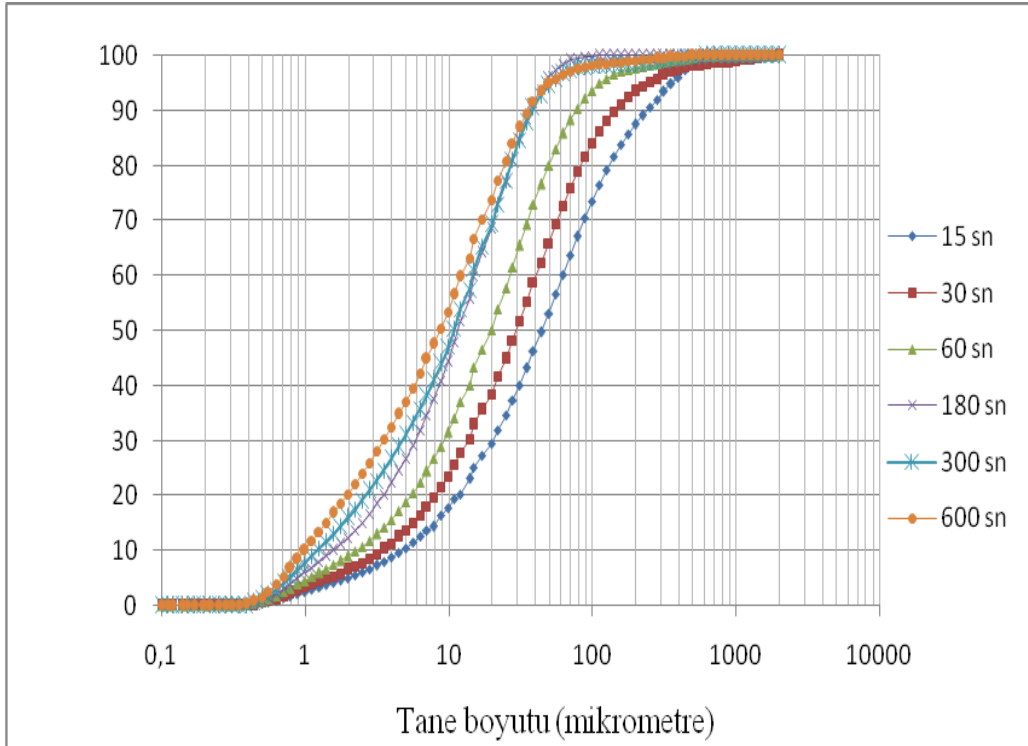
Şekil 4.16 %60 doluluk oranındaki elek altı eğrileri.



Şekil 4.17 %80 doluluk oranındaki elek altı eğrileri.



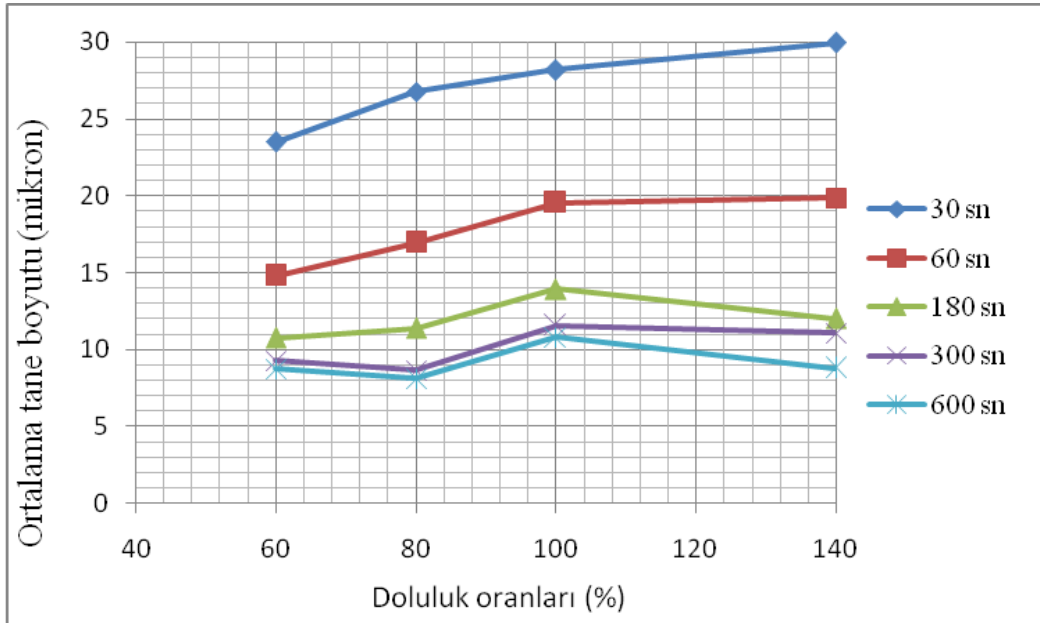
Şekil 4.18 %100 doluluk oranındaki elek altı eğrileri.



Şekil 4.19 %140 doluluk oranındaki elek altı eğrileri.

Doluluk oranının etkisini incelemek için; 1080 dev/dk karıştırma hızında, 4 farklı doluluk oranlarında ve 6 farklı sürede 24 farklı öğütme yapılmıştır. Çizelge 4.7’de doluluk oranı ve öğütme süresine bağlı olarak elde edilen ürünün ortalama tane boyutları verilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere en ince ürün %80 doluluk oranında 8,11 mikron olarak elde edilmiştir. Doluluk oranının artmasıyla öğütmede bir yavaşlamayla sonuçlanmıştır.

Şekil 4.20’de doluluk oranları ile ortalama tane boyutu arasında ilişki grafiği gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi d_{50} boyutu 20 mikron olan ürün elde etmek için %100 doluluk oranında 60 saniye öğütme yapmak gerekir. 15 mikron boyutunda ürün almak için %60 doluluk oranında 60 saniye, 10 mikron boyutu için ise %60 doluluk oranında 180 saniye öğütülmelidir.



Şekil 4.20 Doluluk oranları ve d_{50} tane iriliği arasındaki ilişki.

Çizelge 4.7 Doluluk oranı ve öğütme süresine bağlı olarak elde edilen ürünün ortalama tane boyutu (mikron).

Öğütme süresi (sn) → Doluluk oranı (%) ↓	15 saniye	30 saniye	60 saniye	180 saniye	300 saniye	600 saniye
	60 doluluk oranında d_{50} boyutu (mikron)	35,00	23,48	14,81	10,75	9,27
80 doluluk oranında d_{50} boyutu (mikron)	38,61	26,77	16,94	11,36	8,65	8,11
100 doluluk oranında d_{50} boyutu (mikron)	31,55	28,19	19,54	13,92	11,56	10,81
140 doluluk oranında d_{50} boyutu (mikron)	45,24	29,95	19,86	11,99	11,08	8,78

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye’de hızlı nüfus artışıyla tüketim artışı ve sınırlı kaynaklarında azalmasıyla beraber mevcut kaynakların daha ekonomik kullanılabilirliğini beraberinde getirmiştir. Mermercilik sektöründe görülen gelişmelere bağlı olarak mermer artığı miktarında da büyük artışlar olmuştur.

Batı Avrupa ve Amerika Birleşik Devletlerinde geri kazanım oranı %80’lerde iken, ülkemizde bu oranın %20 civarlarında olduğu belirtilmektedir. İşletmelerde kullanılan mermer üretim teknolojilerine bağlı olarak oluşan atıklar farklı niteliklere sahiptir. Bu atıklar değişik endüstri alanlarında kullanılarak ek bir katma değer yaratılabilmektedir.

Mermer atıklarının taşınma ve depolanma problemlerinin ve bununla birlikte çevreye verdiği zararların da en aza indirgenebilmesi için kullanım alanları tespit edilmiştir ve bu atıkların kullanılabileceği alanların oldukça geniş olduğu görülmüştür.

Endüstri alanlarda kullanılabilmesi için mermer atıklarının 1 ile 100 mikron boyut aralığında öğütülmesi gerekmektedir. Aşırı ince öğütme; geleneksel öğütme ekipmanlarının daha iri öğütücü ortam kullanımından dolayı gerçekleştirilemezken, karıştırılmalı değirmenlerde birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarının çok yüksek olması nedeniyle 10 mikronun altında bile ekonomik öğütmeler yapmak mümkün hale gelmiştir (Celep 2008).

Mermer atıklarının karıştırılmalı değirmende öğütme potansiyeline yönelik ön bulgular elde edilmiştir. Bu bulgular kısaca başlıklar halinde şöyle özetlenebilir:

- Malzemenin kimyasal analizi yapılmış ve CaCO_3 oranı %98,93 olarak belirlenmiştir. Bu oran malzemenin yüksek saflığa sahip olduğunu ve kalsit olarak da kullanılabileceğini göstermektedir. Deneysel sonuçlara göre Marfam mermerin Eskişehir’de bulunan ocak atıklarının, kimyasal bileşimi ve elde edilen boyutlar göz önüne alınarak potansiyel kullanılabilmesi alanlar; çimento, plastik, kağıt, yem, boya, cam ve kozmetik sektörleri olduğu görülmüştür.
- Kullanılan mermer atıkları kırma işlemi gerçekleştirdikten sonraki ortalama tane iriliği (d_{50}) 108 mikron’dur. Karıştırma hızlarının ürün boyutuna etkisinin incelendiği deneylerde, hızın artması elde edilen ürünün tane boyutu dağılımını inceleştirildiği görülmüştür. İnce bilyanın kullanılması ile de ürünün tane boyutunun incelendiğini göstermiştir. Deneysel çalışmalarda 360, 540, 720, 1080, 1440 dev/dk karıştırma hızı değerlerinde çalışılmış ve karıştırma hızı artarken boyut dağılım eğrisinin dikliği artmıştır. Örneğin 540 dev/dk’da d_{50} boyutu 14,36 mikron iken, 1440 dev/dk’da d_{50} boyutu 7,84 mikron elde edilmiştir.
- Optimum süreyi belirlemek için 15, 30, 60, 180 ve 300 saniyede öğütme yapılmış ve gittikçe daha ince ürünler elde edilmiştir. 60 saniyelik öğütmede d_{50} 11,5 mikron boyutunda ürün elde edilirken, süre 300 saniyeye çıktığında d_{50} 8,6 mikron elde edilmiştir.
- Doluluk oranının ürün inceliğine etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, doluluk oranının artışı öğütmede bir yavaşlamayla sonuçlanmıştır. Örneğin %60 doluluk oranında 60 saniyelik öğütme süresinde ortalama tane boyutu 14,81 mikron olan ürün elde edilirken, %140 doluluk oranında 60 saniyede 19,86 mikron boyutunda ürün elde edilmiştir.
- Yapılan öğütmelerin sonucunda 180 saniyenin üzerindeki öğütme sürelerinde öğütme verimi azalmaktadır. Öğütme süresi arttıkça, elde edilen ürünlerin hemen hemen ortalama tane boyutu birbirine yakın olduğu ve ince boyuttaki tanelerin birbirine bağlanarak topaklar oluşturduğu görülmüştür. Bunun nedeni öğütme süresinin fazla olduğundan dolayı öğütme gövdesi ve malzemenin ısınmasından kaynaklanmıştır.

- Çalışmada fark edilen en önemli olumsuzluk değirmen içindeki yüksek hıza bağlı olarak öğütücü ortamın ve tankın aşınmasıdır. Karıştırma hızının yüksek ve öğütme süresinin uzun tutulmasıyla da zirkon bilyalarda kırılma görülmüştür.

Göz önünde bulundurulması gereken faydalı olacak bazı noktalar, aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Öğütme verimini arttırmak ve topaklanmayı önlemek için bazı dağıtıcı kimyasalların öğütme esnasında kullanılması gerekmektedir. Böylelikle daha ince boyutlarda öğütme yapılabilecektir.
- Mermer fabrikalarının yoğun olduğu bölgelerde kırma-eleme-öğütme tesisleri kurularak, mermer tozlarının endüstride kullanılması sağlanmalıdır.
- Türkiye’de mermer atıklarının ekonomiye kazandırılması ile ilgili olarak 100 civarında bilimsel araştırma yapılmıştır. Fakat yapılan araştırmaların birçoğu, zorlayıcı ve yönlendirici tedbirlerin olmaması, teşvik ve motive edici düzenlemelerin olmaması gibi nedenlerden dolayı hayata geçirilememiştir. Hükümetler, atıkların kullanımı ve yeniden kazanımı için teşvikler uygulamalı ve bu kaynakların sürdürülebilir tüketimi ve sürdürülebilir bir ekonomi için endüstrilerde kullanımı desteklenmelidir.

KAYNAKLAR

- Alyamaç K E and İnce R** (2008) A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building materials*, 1-10.
- Avşar Ç** (1996) Determination of grindability characteristics clinker and tras mixture, Phd Thesis, METU. 126 p.
- Bilensoy M** (2010) Mermer fabrikaları toz atıklarının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 46s.
- Bilgili E, Hamey R and Scarlett B** (2004) Production of pigment nanoparticles using a wet stirred mill with polymeric media. *China particuology*, 2(3): 93-100.
- Bond F K and Maxon W L** (1938) Standart grindability test and calculations, *Trans. SME/AIME*, 153:362-372.
- Bond F C** (1947) Standart grindability test and calculations, *Trans. SME/AIME*, 183:313-329.
- Bond F C** (1951) Third theory of comminution, *Trans. AIME*, 193: 484-494.
- Bond F C** (1961) Crushing and grinding with pyroprocessing. *Pit and Quarry*, 193:162-166.
- Braun R M, Kolacz J and Hoyer D I** (2002) Fine dry comminution of calcium carbonate in a Hicom mill with an inprosys air classifier. 15: 123-129.
- Celep O ve Alp İ** (2008) Karıştırmalı değirmenler ile ince öğütmenin refrakter altın cevherlerine uygulanabilirliğinin incelenmesi. *Madencilik*, Cilt 47, sayı 3, s. 15-26.
- Ceylan H, Saraç S ve Özkahraman H T** (2001) Mermer toz atıklarının derz dolgu malzemesi üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Türkiye 3. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 297-307.
- Çelik M Y** (1996) Mermer atıklarının değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Çelik M Y, Saruşık A ve Gürçan S** (2003) Mermer ve taş ocaklarının çevreye olan görsel etkileri. Maden Mühendisleri Odası, *Mersem 2003*, Afyonkarahisar.
- Deniz V** (2004) Doğal amorf silikanın kinetik öğütme parametrelerine hacimsel bilya ve malzeme doluluk oranlarının etkisi. 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 130-137.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Deniz V** (2004) Relationship between bond's grindability and breakage parametres of grinding kinetic on limestone. *Powder Technology*, 139: 208-213.
- Ding H, Lu S, Dendg Y and Du G** (2007) Mechano-activated surface modification of calcium carbonate in wet stirred mill and it's properties. *Transections of Nonferrous Metals Society of China*, 17: 1100-1104.
- DPT** (2001) *Yapı Malzemeleri 2 (Mermer – Granit – Yapı Taşları – Arduvaz)*. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- Ergin H** (1999) *Boyut küçültme teknolojisi: çimento öğütme devrelerinin modelleme ve simulasyonlu optimizasyonu*. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporu (ÜNİPR 96/09), 133 s.
- Erkan Z E ve Malayoğlu U** (2001) Kağıt-karbon sanayinde kullanılan endüstriyel hammaddeler ve özellikleri. 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, s. 250-257.
- Erkan Z E, Sabah E ve Çelik M Y** (2004) Mermer işleme tesisi artıklarının kağıt dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, s. 233-240.
- Fadhel H and Frances C** (2001) Wet batch grinding of alumina in a stirred bead mill, *Powder Technology*, 119:257-268.
- Gao M, Young M F, Cronin B and Harbert G** (2000) Isamill medium competency and its effect on milling performance. *SME Annual Conference*, Salt Lake City, Utah USA, February 28-1 March, 7 pp.
- Geçgil Ş** (1988) *İlaç gıda ve kozmetik konuları ile ilgili yasa yönetmelik kararname ve bildirgeler*, Eczacılık, İstanbul.
- Hacıfazlıoğlu H** (2009) İnce ve çok ince öğütme için alternatif değirmen tiplerinin tanıtılması, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2009-01, 17-30.
- Hardgrove R M** (1938) Grindability of coal, Trans ASME, *Fuels and Steam Power*, FSP-54-5 pp. 37-46.
- Hukki R T** (1961) Proposal for solomonic settlement between the theories of Von Rittinger, *Kick and Bond. Trans. AIME*, 220: 403-408.
- İpek H** (2003) Seramik hammadde karışımlarının öğütülebilirlik özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi (yayımlanmamış), Osmangazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Müh. Anabilim Dalı, Eskişehir, 181s.
- İpekoğlu Ü ve Tanrıverdi M** (1994) *Cevher hazırlama*. D.E.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları, Genişletilmiş II. Baskı, 215s, İzmir.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Jankovic A** (2003) Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*, 337-345.
- Jankovic A and Sinclair S** (2006) The shape of product size distributions in stirred mills, *Minerals Engineering*, 19: 1528-1536.
- Kavas T, Evcin A ve Önce G** (2003) Afyon bölgesi mermer atıklarının (Şlam) kalsiyum alüminalı refrakter çimento üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Türkiye 4. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 363-370.
- Kick F** (1885) *Das gesetz der proportionalen widerstand und seine anwendung*, Leipzig.
- Köktürk U** (2002) *Endüstriyel hammaddeler*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını, İzmir.
- Kun M, Onargan T ve Yüksel S** (2006) Traverten fabrika artıklarının dolgu işlemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Türkiye 5. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 373-381.
- Kwade A** (1999) Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application. *Powder Technology*, 105: 14-20.
- Kwade A, Blecher L and Schwedes J** (1996) Motion and stres intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2: stres intensity and its effect on comminution. *Powder Technology*, 86: 69-76.
- Lynch A J** (1977) Mineral crushing and grinding circuits: Their Simulation, *Optimisation, Design and Control*, Elsevier Scientific Publishing Company, 342 pp.
- Mankosa M J, Adel G T and Yoon R H** (1986) Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal. *Powder Technology*, 49: 75-82.
- Mcintyre A and Pitt L R** (1980) The interrelationship between Bond and Hardgrove grindabilities. *CIM Bulletin*, 149-155.
- MEGEP** (2009) *Boya üretimi, Kimya Teknolojisi, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi* (MEGEP), Ankara.
- Mineset Partner Report** (2002) The Global Outlook fpr Extender and Filler Minerals in Paper, *Mineset Partners LLC*, Rockaway.
- Miranda S and Yaeger S** (1998) Homing on the best size reduction method. *Chemical Engineering*, 105: 102-110.
- Naydowski C** (1999) The Contribution of minerals in the paper value creating chain, *Plüss-Stauffer AG/OMYA*, Oftringen-Schweiz, 7 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Onargan T, Köse H ve Deliormanlı A H** (1992) *Mermer üretimi kesme teknolojisi, ekonomisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Onargan T** (2007) *Mermer Madenciliğinde Çevre Yönetimi, II. Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, Ankara.
- Orumwense O A and Forssberg E** (1992) Super fine and ultra-fine grinding-A literature survey, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 11(1-2):107-127.
- Önem Y** (2000) *Sanayi madenleri*, Kozan Ofset Mat. San. ve Tic. Ltd. Şti., Ankara.
- Pilevneli C C** (2003) Bilyalı bir karıştırmalı değirmende ince boyutlu klinker öğütmesinin incelenmesi, Doktora Tezi, Karaelnas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 22 s.
- Remeyni K** (1974) The theory of grindability and the comminution of binary mixtures, *Akademiai Kiado*, Budapest, 144 p.
- Rittinger P R** (1867) *Lehrbuch der aufbereitungs kunde*, Ernst and Korn, Berlin.
- Sabah E ve Çelik M Y** (2001) İsehisar (Afyon) mermer artıklarının hayvan yemi katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Türkiye 3. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 309-316.
- Sabah E ve Erkan Z E** (2004) Kağıt üretim teknolojisini değiştiren mineral: kalsiyum karbonat. 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İzmir, s. 101-109.
- Samanlı S** (2008) Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali Katı Fosil Yakıtı Öğütme Kinetiğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Karaelmas Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, s. 15.
- Sinnott M, Clearly P W and 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.
- Sinnott M, Clearly P W and Morrison R** (2006) Analysis of stirred mill performance using DEM simulation: Part 2- coherent flow structures, liner stress and wear, mixing and transport. *Minerals Engineering*, 19: 1551-1572.
- Sverak T** (2007) Today's trends of comminution process, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering.
- Şahin T ve Şahin Ş** (2007) Kalsiyum karbonat mineral dolgu maddesinin polipropilen random kopolimer boru malzemesinin performansına etkisi. 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, İstanbul, s. 269-279.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Şentürk A, Gündüz L, Tosun Y ve Sarıışık A** (1996) *Mermer teknolojisi*, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik – Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği, Isparta.
- Toraman Ö Y, Uçurum M ve Katırcıoğlu D** (2009) Eş-boyutlu mikronize kalsitin boya ve kağıt sektöründe ürün kalitesine etkisi. 7. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 225–231.
- Tur Ş** (2007) Afyonkarahisar’da mermer artıklarının depolanması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, 25s.
- Tüzün M A** (1994) A study of comminution in a vertical stirred ball mill, Doktora Tezi, Chemical Engineering Department, University of Natal.
- Tüzün M A, Loveday B K and 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.
- T.S.E** (1989) *Öğütme iş indeksi tayini*, TS 7700.
- Ünal O ve Kibici Y** (2001) Mermer tozu atıklarının beton üretiminde kullanılmasının araştırılması. *Türkiye 3. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 317-325.
- Wang Y and Forsberg E** (2000) Product size distribution in stirred media mills. *Minerals Engineering*, 13: 459-465.
- Wang Y and Forsberg E** (2007) Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution. *China Particology*, 193-201.
- Weller K R, Gao M and Bowev P** (2000) Scaling-up horizontal stirred mills from a 4 litre test mill to a 4000 litre “ISAMILL” , *Mount Isa Mines Ltd.*, 8 pp.
- Wills B A** (1985) *Mineral processing technology*, 3rd Ed., Pergamon Press, GB, 630 pp.
- Yıldız A H, Kardeşin M, Çavuş U Ş ve Taciroğlu M** (2006) Mermer endüstrisi atık çamurlarının yol inşaatında stabilizasyon malzemesi olarak değerlendirilmesi. *Türkiye 5. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Afyon, s. 97-106.
- Yıldız N** (2007) *Cevher Hazırlama*. ERTEM Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti, 41-193 s, Ankara.
- Yiğit E** (1997) *Cevher Hazırlama*. ZKÜ Müh. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, 182 s.
- Yüce E** (2008) Boyut küçültme (kıırma-öğütme) ve sınıflandırma teknolojisi, Yenilikler ve proses maliyetlerine etkileri, *Cevher ve Kömür Hazırlama Tesislerinde İşletme Denetimi ve Verim Arttırma Kursu*, 21-25 Ocak 2008, YMGV Yayını.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

Young M F and Gao M (2000) Performance of the Isa Mills in the George Fisher Flowsheet, *Proceedings of Aus IMM Seventh Mill Operators Conference*, Kalgoorlie, Western Australia, 12-14 October, p. 75-81.

ÖZGEÇMİŞ

Hasan Ali TANER 1986'da Antalya'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Akseki Şahinler Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2003 yılında ZKÜ Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2008'de "iyi" derece ile mezun olduktan sonra 3 yıl boyunca maden sektöründe maden mühendisi olarak çalıştı. 2011 yılında İnönü Üniversitesi'nde (İÜ) Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen 2009 yılında girdiği BEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programını sürdürmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : İnönü Üniversitesi, Merkez Kampüsü
Mühendislik Fakültesi,
Maden Mühendisliği Bölümü/MALATYA

Tel : (422) 377 4731

Faks : (422) 377 3000

E-posta : hasan.taner@inonu.edu.tr