

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAN KÜLÜNÜN KARIŞTIRMALI BİLYELİ DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLEREK
PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN ARTIRILMASI VE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
KULLANIMININ İNCELENMESİ



MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
BARIŞ AKKAYA

HAZİRAN 2021

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TABAN KÜLÜNÜN KARIŞTIRMALI BİLYELİ DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLEREK
PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN ARTIRILMASI VE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE
KULLANIMININ İNCELENMESİ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALINDA
DOKTORA TEZİ
Barış AKKAYA

DANIŞMAN: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

ZONGULDAK
HAZİRAN 2021

KABUL:

Barış AKKAYA tarafından hazırlanan “Taban külünün karıştırılmalı bilyeli değirmende öğütülerek pozolanik aktivitesinin artırılması ve çimento üretiminde kullanımının incelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 16/06/2021

Danışman: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden
Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Ş. Levent ERGÜN

.....
Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. A. Ali SİRKECİ

.....
İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Cevher Hazırlama
Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Sait KIZGUT

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği
Bölümü

Üye: Prof. Dr. A. Dilek CUHADAROĞLU

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği
Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

....../....../20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
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.”

Bariş AKKAYA

ÖZET

Doktora Tezi

TABAN KÜLÜNÜN KARIŞTIRMALI BİLYELİ DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLEREK PUZOLANİK AKTİVİTESİNİN ARTIRILMASI VE ÇİMENTO ÜRETİMİNDE KULLANIMININ İNCELENMESİ

Barış AKKAYA

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

Haziran 2021, 133 sayfa

Bu çalışmada, karıştırmalı bir bilyeli değirmende kuru öğütme ile taban külünün öğütülerek, çimento ikame malzemesi olarak kullanım olanakları incelenmiştir. Taban külü örnekleri Eren Enerji Termik santralinden temin edilmiş ve öğütme için gerekli hazırlık işlemlerinin ardından her bir öğütme deneyinde kullanılacak miktara göre tasnif edilerek öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Karıştırmalı bilyeli değirmende (KD)'de öğütme işlemlerinde, öğütme süresi ve karıştırma hızının öğütme ürününün tane boyutu ve özgül yüzey alanı gibi özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bu öğütme koşullarında harcanan özgül enerji miktarları araştırılmıştır.

Farklı öğütme koşullarında öğütülen taban külü ürünlerinin değişen tane boyutları ve özgül yüzey alanlarına göre, çimento ikame malzemesi olarak kullanımlarının incelenmesi için puzolanik aktivite testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak, taban külünün aşırı öğütülmesinin, hem yüksek enerji sarfıyatı, hem de üretilecek betonun özelliklerini olumsuz etkilemesi gözönüne

ÖZET (devam ediyor)

alınarak, uygun tane boyutu ve buna bağlı öğütme şartlarının tespit edilmesine çalışılmıştır. Bu çalışmada, birim hacimde yüksek enerji sağlayabilme performansı nedeniyle laboratuvar ölçekli dikey pinli bir KD kullanılmıştır.

Genel olarak taban külünün çimento ikamesinde kullanılması ile mevcut çimento değirmenlerinde öğütülen klinker malzemesi için gerekli olan hammaddelerin azaltılması hedeflenmektedir. Dolayısıyla bu hammaddelerin hazırlanması aşamasındaki çevresel ve enerji tüketimi ile ilgili olumsuzlukları hafifletme olanaklarının değerlendirilmesi yapılmıştır.

Deney sonuçlarına göre taban külünün istenen puzolanik özellikleri göstermesi için Portland çimentosunun tane incelliğine ve özgül yüzey alanına ulaşıncaya kadar öğütülmesi yeterli olmuştur. Taban külünün çimento ikamesi için, çok ince öğütülmesinin gerekli olmaması, umut verici bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, öğütme için giderek artan önemi ile KD kullanılmasının, taban külünün çimento ikamesi olarak kullanım imkanını arttıracığı gösterilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Taban Külü, Öğütme, Çimento, Karıştırmalı Değirmen, Puzolanik Aktivite

Bilim Kodu: 607.02.00

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE INVESTIGATION OF INCREASING POZZOLANIC ACTIVITY OF BOTTOM ASH BY GRINDING IN A STIRRED BALL MILL AND ITS USE IN CEMENT PRODUCTION

Bariş AKKAYA

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

Thesis Advisor: Prof. Dr. İhsan TOROĞLU

June 2021, 133 pages

In this study, the usability of bottom ash as a cement replacement materials was investigated through using its dry grinding in a stirred ball mill. The bottom ash samples were obtained from Eren Enerji Thermal Power Plant and After the preparation process, bottom ash was prepared it is allocated according to amount of the materials used for each grinding test. I

In grinding tests, some grinding parameters were evaluated such as grinding period and stirrer speed. In addition to that, the specific energy consumptions were investigated in these grinding conditions.

To investigate the usage of bottom ash products from different grinding conditions in the replacement of cement, the Strength activity index tests were performed. However, it was made a proper particle size and relevant grinding conditions to that by considering of high energy consumption and some negative effects of excessive grinding of bottom ash. In this study, A lab

ABSTRACT (continued)

scale verticle pinned stirred mill was used since its high performance of ability to supply high energy density in unit volume.

In general, it is aimed that a decreasing of raw materials used for ground clinker by replacement of bottom ash in cement. Hence, it was evaluated the opportunity of mitigating the negative effects occurred in duration of the preparation process of the raw material, which is in related to problem about environmental and energy consumption

According to the tests results, the bottom ash grinding to reach the fineness and specific surface area of Portland cement is adequate for the required pozzolanic traits. The low neccesity of bottom ash to be ground for utility as a cement replacement material can be considered as a hopeful result. Additionally, it is presented that the usage of stirred mill by its getting more imporatance has positive effect on the utilability of bottom ash as cement replacement.

Keywords: Grinding, Cement, Bottom Ash, Stirred Mill, Pozzolanic Activity

Science Code: 607.02.00

TEŞEKKÜR

Çalışmanın genel hatlarını ortaya çıkarmamda çok emeği olan danışman hocam Prof. Dr. İhsan TOROĞLU'na, özellikle tez izleme kurullarında konuya katkıları olan Prof. Dr. Sait KIZGUT'a, tez ile ilgili sorunlarımı sabırla dinleyip tecrübeleriyle bu sorunlardan sıyrılmama yardımcı olan Prof. Dr. Ayşe Dilek CUHADAROĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tecrübelerinden her zaman yararlanılması gereken Prof. Dr. Melih GENİŞ, Doç. Dr. Mehmet Erdiñ BİLİR, Dr. Öğr. Üyesi Serdar Yılmaz ve Arş. Gör. Dr. Mehmet BİLEN, Arş. Gör. Dr. Utku SAKIZ ve Arş. Gör. Dr. Haşim DURU'ya da teşekkürler ediyorum.

Bana zaman ayırarak konunun felsefesini daha iyi kavrayabilmemi sağlayan Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Şevket Levent ERGÜN, Dr. Öğr. Üyesi Caner ORHAN ve Doç. Dr. Okay ALTUN hocalarıma teşekkürler ediyorum. Ayrıca, İstanbul Teknik Üniversitesi Cevher Hazırlama Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Ayhan Ali SİRKECİ hocama da önemli desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Tez için gerekli çimento hammaddelerinin temininde yardımlarını esirgemeyen Volkan Çelebi ve Bartın Çimento Fabrikası Yönetimine ve taban külü örneklerinin temininde Halil İbrahim GÖNÜL ve Eren Enerji Termik Santrali yönetimine çok teşekkürler ederim.

Başta hepsinin adlarını belirtmediğim tüm bölümümüz akademisyenleri ve çalışanlarına ve bilimin enerji, boyut küçültme ve çevre arasındaki ilişkiyi esas alan bu önemli konusu üzerine çalışmalar yapmış, tezimde yayınlarından yararlandığım veya yararlanmadığım tüm bilim insanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde bana sürekli olumlu telkinlerde bulunan başta eşime ve kayın pederime de teşekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
 BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	 1
 BÖLÜM 2 BOYUT KÜÇÜLTME.....	 5
 2.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN ESASLARI	 5
2.1.1 Tanelerin Ufalanabilirliği	6
2.1.2 Cevherin Mekanik Özellikleri	6
2.2 BOYUT KÜÇÜLTMEDE TANE BOYUTU KAVRAMI	7
2.3 BOYUT KÜÇÜLTME ORANI KAVRAMI	9
2.4 BOYUT KÜÇÜLTMEDE ETKİN OLAN KUVVETLER.....	11
2.5 BOYUT KÜÇÜLTME TEORİLERİ.....	13
2.5.1 Rittinger Kanunu	14
2.5.2 Kick Kanunu	14
2.5.3 Bond Kanunu	15

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

Sayfa

BÖLÜM 3 KIRMA İŞLEMİ VE KIRICI CİHAZLAR.....	19
3.1 DÖNER KIRICILAR	21
3.2 ÇENELİ KIRICILAR.....	22
3.3 DARBELİ KIRICILAR.....	23
3.4 KONİK KIRICILAR	24
3.5 MERDANELİ KIRICILAR	25
BÖLÜM 4 ÖĞÜTME İŞLEMİ VE DEĞİRMENLER.....	27
4.1 ÖĞÜTMEDE TÜKETİLEN ENERJİ VE ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK KAVRAMI.....	27
4.1.1 Bond Deneyi	28
4.1.2 Hardgroove Deneyi.....	30
4.2 DEĞİRMENLER.....	30
4.2.1 Aktarılan Ortam Türü Değirmenler	31
4.2.1.1 Tambur Tipi Değirmenler	31
4.2.1.2 Titreşimli Değirmenler	34
4.2.1.3 Yörüngesel Değirmenler	34
4.2.1.4 Karıştırmalı Değirmen.....	34
4.2.2 Merdaneli Değirmen.....	35
4.2.2.1 Valsli Değirmen	35
4.2.2.2 Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen	36
4.3 KARIŞTIRMALI DEĞİRMENLER	37
4.3.1 Karıştırmalı Değirmenlerde İncelenen Değişkenler ve Etkileri	39
4.3.1.1 Karıştırma Hızının Etkisi	40
4.3.1.2 Boncuk Boyutunun Etkisi	40
4.3.1.3 Boncuk Yoğunluğunun Etkisi	41
4.3.1.4 Boncuk Doluluk Oranının Etkisi.....	41
4.3.1.5 Boncuklar Arası Malzeme Doluluk Oranı Etkisi	41
4.3.1.6 Pülp Yoğunluğu ve Visikosite etkisi.....	42
4.3.1.7 Besleme Boyutunun Etkisi	42

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.3.2 Karıştırmalı Değirmenlerin Tasarım ve İşletme Özellikleri	43
4.3.3 Karıştırmalı Değirmen Modelleri	44
4.3.4 Karıştırmalı Değirmenlerin Kullanım Alanları	49
 BÖLÜM 5 ÇİMENTO	 51
5.1 ÇİMENTO ÜRETİMİ	52
5.1.1 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler ve Yardımcı Malzemeler.....	53
5.1.1.1 Ana Hammaddeler.....	53
5.1.1.2 Katkı Maddeleri ve Yardımcı Malzemeler.....	54
5.1.2 Hammadde Üretimi ve Hazırlama	56
5.1.3 Klinker Üretimi.....	58
5.1.3.1 Klinker Oluşum Tepkimeleri ve Mineralojik Bileşimi	59
5.1.4 Klinker Öğütme	60
5.2 HİDRATASYON TEPKİMELERİ VE BETON OLUŞUMU.....	61
5.3 TSE STANDARTLARINA GÖRE ÇİMENTO TURLERİ.....	62
 BÖLÜM 6 TERMİK SANTRALLER VE ATIK MADDELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	 65
6.1 KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLER.....	65
6.1.1 Kömür Yakıtlı Santrallerde Oluşan Atık Maddeler.....	66
6.1.1.1 Termik Santral Külleri	66
6.1.1.2 Baca Gazı Kükürtsüzleştirme Ürünü (Desülfojips)	67
6.2 TERMİK SANTRAL KÜLLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	67
6.2.1 Termik Santral Küllerinin Çimento Üretiminde Kullanılması	68
6.2.2 Puzolanik Aktivite ve Küllerin Beton Üretimindeki Puzolanik Etkileri	68
 BÖLÜM 7 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	 71
7.1 LABORATUVAR DONANIMI	71
7.2 DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEM.....	71

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7.2.1 Malzemelerin Temini ve Genel Bilgiler	73
7.2.2 Yöntem	73
7.3 DENEY ÖN HAZIRLIKLARI VE ANALİZ İŞLEMLERİ.....	74
7.3.1 Bond Deneyinin Yapılışı	75
5.3.2 Tane Boyutu Analizleri.....	78
7.3.3 Yoğunluk Analizleri	79
7.3.3.1 Hava Sıkıştırılmalı Piknometre ile Yoğunluk Analizinin Yapılması	79
7.3.3.2 Balon Joje ile Yoğunluk Tayini	80
7.3.4 Özgül Yüzey Alanının Ölçülmesi.....	81
7.4 TABAN KÜLÜNÜN KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMESİ.....	85
7.4.1 Öğütme Süresinin Ürün Boyutuna Etkisinin İncelenmesi.....	88
7.4.2 Öğütmede Karıştırma Hızının Ürün Boyutuna Etkisinin İncelenmesi	88
7.4.3 Taban Külünün Düşük Öğütme Sürelerinde Öğütülmesi.....	88
7.4.4 Karıştırılmalı Değirmende Özgül Enerjinin (ÖE) Hesaplanması	89
7.5 PUZOLANİK AKTİVİTE İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ.....	90
7.5.1 Beton Harçlarının Hazırlanması	91
7.5.2 Harcın Karıştırılması	92
7.5.3 Harcın Standart Kalıplara Dökülmesi.....	93
7.5.4 Kalıplara Kür İşleminin Uygulanması.....	94
7.5.5 Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımlarının Ölçülmesi.....	95
7.5.6 Küllerin Puzolanik Aktivite İndekslerinin Belirlenmesi	97
7.6 DENEYSEL SONUÇLAR	97
7.6.1 Sabit Karıştırma Hızında Öğütme Deneyi Sonuçları.....	98
7.6.1.1 Öğütme Ürünleri ve Diğer Bağlayıcı Maddelerin Boyut Analizi Sonuçları	98
7.6.1.2 Öğütmede Özgül Enerji- Tane Boyutu İlişkisi.....	100
7.6.1.3 Öğütme Ürünlerinin ve Diğer Bağlayıcı Maddelerin Puzolanik Aktivite İndeksleri.....	100
7.6.2 Farklı Karıştırma Hızlarında Öğütme Deneyleri Sonuçları.....	102
7.6.2.1 Öğütme Ürünlerinin Özgül Enerji ve Tane Boyutu İlişkisi	102
7.6.3 Kısa Öğütme Sürelerinde Deney Sonuçları	104
7.6.3.1 Kısa Öğütme Sürelerinde Özgül Enerji ve Tane Boyutu İlişkisi	104

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
7.6.3.2 Taban Külünün Düşük Öğütme Süresi ve Karıştırma Hızlarında Puzolanik Aktivite İndeksleri	106
7.6.3.3 Taban Külünün Kısa Öğütme Süresi ve Yüksek Karıştırma Hızları İçin Puzolanik Aktivite İndeksleri	108
7.6.4 Tüm Kademelerde Kısa Öğütme Sürelerindeki Blaine Yüzey Alanının Değişimi	110
7.6.5 Taban Külü ve Uçucu Külün Uzun Süreli (1 yıl) Puzolanik Aktivite İndeksi Sonuçları	111
7.6.6 Tüm Öğütme Şartları İçin Genel Deneysel Sonuçlar	112
7.6.7 Tane Boyutuna Göre Genel Olarak Puzolanik Aktivite İndeksinin Değişimi	115
7.7 DENEYSEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	116
 BÖLÜM 8 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	123
 KAYNAKLAR	125
 BİBLİYOGRAFYA.....	131
 ÖZGEÇMİŞ.....	133



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Bir tanenin martin, feret ve küresel izdüşüm alanı çaplarının gösterimi.	8
Şekil 2.2 Ufalamada baskı ve kesme kuvveti yoluyla zorlamanın şematik gösterimi.	12
Şekil 2.3 Ufalamada darbe kuvveti etkisinin şematik gösterimi.	12
Şekil 2.4 Boyut küçültme işleminde oluşan çarpma kuvveti şekilleri.	13
Şekil 3.1 (a) Açık devre (sınıflandırıcısız), (b) Açık devre (sınıflandırıcılı), (c) Kapalı devre.	20
Şekil 3.2 Döner kırıcı kesiti.....	21
Şekil 3.3 Çift salgı kollu Blake tipi çeneli kırıcı kesiti ve besleme ağzına göre isimlendirme ölçüleri.	23
Şekil 3.4 Darbeli kırıcı	24
Şekil 3.5 Konili kırıcı kesit görünümü.	25
Şekil 4.1 Çubuklu değirmen kesit görünümü.....	32
Şekil 4.2 Bilyalı değirmenlerin kesit görünümü	33
Şekil 4.3 Valsli değirmenin kesit görünümü.	36
Şekil 4.4 Yüksek basınçlı merdaneli değirmenin kesit görünümü.....	37
Şekil 4.5 Dikey pinli karıştırılmalı değirmen şematik gösterimi	43
Şekil 4.6 (a) Tower Mill, (b) Verti Mill gösterimi	46
Şekil 4.7 Stirred Media Detritor	47
Şekil 4.8 Outotech HIGmill gösterimi	48
Şekil 4.9 Isa-Mill şematik gösterimi	49
Şekil 5.1 Genel olarak çimento üretimi.....	52
Şekil 5.2 Ön kalsinasyon ve döner fırın çalışma prensibi gösterimi	59
Şekil 5.2 Çift kamaralı bilyeli değirmeni kesiti	61
Şekil 6.1 Kömür yakıtlı bir termik santralin genel çalışma şekli.	65
Şekil 6.2 Çimento içine kül ikamesi ve bağlayıcı jellerin oluşumu.	70
Şekil 7.1 Çimentonun mevcut durumda beton üretiminde kullanımı.	74
Şekil 7.2 Çimentonun taban külü ikamesi ile beton üretiminde kullanımı.	74
Şekil 7.3 Standart Bond değirmeni.	78
Şekil 7.4 Malvern Masterseizer S2000 tane boyutu ölçüm cihazı.	78

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
Şekil 7.5 Hava sıkıştırmalı piknometre.	80
Şekil 7.6 Blaine yüzey alanı manometresi'nin şematik görünümü.	82
Şekil 7.7 Laboratuvar ölçekli dikey karıştırma değirmen resmi.	85
Şekil 7.8 Üç fazlı sayaç ve inverter.	89
Şekil 7.9 Deneylerde kullanılan harç makinesi.	92
Şekil 7.10 (a) Harç kalıbı parçaları, (b) Birleştirilmiş kalıp, (c) Kalıp başlığı.	93
Şekil 7.11 Kalıp sarsma cihazı.	94
Şekil 7.12 Beton örneklerinin (16x4x4 cm ³ boyutlarında) su içerisinde bekletilmesi.	95
Şekil 7.13 (a) Beton kesme makinesi, (b) Tek eksenli basınç dayanımı makinesi.	96
Şekil 7.14 (a) Dayanım makinesinde kırma, (b) Kırma başlıkları.	96
Şekil 7.15 Pozolanik aktivite tespiti için genel akım şeması.	97
Şekil 7.16 PÇ, UK ve farklı sürelerde sabit karıştırma hızında öğütülmüş TK'nün birikimli elek altı miktarlarının karşılaştırılması.	99
Şekil 7.17 Öğütme ürünlerinin tane boyutu ile özgül enerji arasındaki ilişki.	100
Şekil 7.18 Tane boyutuna göre çimento bağlayıcı malzemelerinin pozolanik aktivite indekslerinin değişimi.	102
Şekil 7.19 Karıştırma hızının öğütme süresine bağlı olarak ürün boyutuna etkisi.	103
Şekil 7.20 Özgül enerjinin karıştırma hızına ve 5-10-15-20 dk öğütme sürelerine göre değişimi.	104
Şekil 7.21 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızlarına göre tane boyutunun değişimi.	105
Şekil 7.22 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızlarına göre özgül enerji tüketiminin değişimi.	106
Şekil 7.23 Düşük karıştırma hızı ve kısa öğütme sürelerinde pozolanik aktivite indeksinin değişimi.	108
Şekil 7.24 Taban külünün yüksek karıştırma hızları ve kısa öğütme sürelerinde pozolanik aktivite indeksinin değişimi.	110
Şekil 7.25 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızı ve öğütme sürelerine bağlı olarak özgül yüzey alanının değişimi.	110
Şekil 7.26 Farklı bağlayıcı maddeler ile ikame edilen betonların kısa ve uzun kür süreleri sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması.	112
Şekil 7.27 Bağlayıcı maddelerin değişik kür sürelerinde pozolanik aktivite indeksi değerlerinin değişimi.	112
Şekil 7.28 Öğütmede tüm karıştırma hızlarında kullanılan özgül enerjinin farklı birikimli miktarlara göre a) d90, b) d50, c) d10 tane boyutuna etkisi.	113
Şekil 7.29 Özgül yüzey alanı ve özgül enerji arasındaki ilişki.	114

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No

Sayfa

Şekil 7.30 Özgöl yüzey alanı ile tane boyutu arasındaki ilişki. 115

Şekil 7.31 Tane boyutuna göre TK'nün 7 ve 28 günlük % PAI değerlerinin değişimi. 115





ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 Portland Çimentosu Kimyasal Bileşimi.....	57
Çizelge 5.2 Klinker içerisindeki bileşimler.....	60
Çizelge 7.1 Pozolanik malzemelerde istenen kimyasal özellikler	72
Çizelge 7.2 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimleri.	72
Çizelge 7.3 Taban külünün elek analizi sonuçları.....	75
Çizelge 7.4 Civa yoğunluğu ve hava viskozitesinin sıcaklıkla ilişkisi.....	84
Çizelge 7.5 Kontrol beton harcı genel bileşimi ve oranları.....	91
Çizelge 7.6 Deneme beton harçlarının genel bileşimi ve oranları.	92
Çizelge 7.7 Taban külü, çimento ve uçucu külün elek analizleri.....	99
Çizelge 7.8 Sabit karıştırma hızı (900 d/d) ve farklı sürelerde öğütülmüş taban külü ve diğer bağlayıcı madde örneklerinin % PAI değerlerinin karşılaştırılması.	101
Çizelge 7.9 Farklı karıştırma hızı ve öğütme sürelerinin öğütme ürünü tane boyutuna etkisi.	103
Çizelge 7.10 Kısa öğütme sürelerinde özgül enerji ve tane boyutu ilişkisi.	105
Çizelge 7.11 Düşük karıştırma hızı ve öğütme süreleri için taban külünün tane boyutuna bağlı pozolanik özelliklerinin değişimi çizelgesi.....	107
Çizelge 7.12 Yüksek karıştırma hızı ve öğütme süreleri için taban külünün tane boyutuna bağlı pozolanik özelliklerinin değişimi çizelgesi.....	109
Çizelge 7.13 İnce taban külü ve uçucu külün pozolanik aktivitesinin farklı kür süreleri için karşılaştırılması.	111



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

b	: Besleme
$\ddot{u}$	: Ürün
d	: Tane boyutu
d_{50}	: Ortalama tane boyutu (μm)
db_{max}	: Besleme malı en büyük tane boyutu
$d\ddot{u}_{max}$	: Ufalama ürünü en büyük tane boyutu
db_{80}	: Besleme malının % 80'inin geçtiği tane boyutu
$d\ddot{u}_{80}$	: Ufalama ürününün % 80'inin geçtiği tane boyutu
db_{50}	: Besleme malının % 50'sinin geçtiği tane boyutu
$d\ddot{u}_{50}$	: Ufalama ürününün % 50'sinin geçtiği tane boyutu
K_I	: Her bir çatlağın uç noktasında bir gerilim yoğunluğu faktörü
K_{IC}	: Kritik gerilim yoğunluğu, (kırılma tokluğu)
$\dot{O}E$	: Özgül enerji kWh/t
P_b	: Değirmenin boş çalışmada çektiği güç, kW
P_d	: Değirmenin dolu çalışmada çektiği güç, kW
ΔP	: Değirmenin çektiği net güç ($P_b - P_d$), M_p
M_k	: Katı ağırlığı, gr
M_s	: Sıvı ağırlığı,
W	: Değirmen içinde öğütülen anlık malzeme miktarı, gr
C_x	: Öğütmede özgül enerji hesabında deney sabiti.
γ	: Malzemenin Yüzey enerjisi, J/m^2
K_R	: Rittinger teorisine göre deneysel özgül enerji katsayısı
E_R	: Rittinger teorisine göre öğütmede özgül enerji, kWh/ton
ρ	: Yoğunluk
σ	: Boyut Faktörü
γ_{son}	: Malzemenin öğütmeden sonraki yüzey enerjisi, J/m^2

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

γ_{ilk}	: Malzemenin öğütmeden önceki yüzey enerjisi
G_{bp}	: Değirmen deviri başına kontrol eleği altına ufalanan miktar, g/d
e	: Gözeneklilik (Blaine deneyi için 0,5 olarak kabul edildi)
K	: Deney düzeneğinin kalibrasyon sabiti
S	: Referans numunenin Blaine özgül yüzey alanı, cm^2/g
η	: Sıcaklığa göre havanın viskozitesi (Pa.s)
t	: Ölçülen zaman (sn)
V_d	: Değirmenin etkin hacmi, cm^3
J	: Bilya doluluk oranı, %
d_b	: Bilya özgül ağırlığı
V_{by}	: Bilyaların boşluklu (yığın) hacmi
e	: Bilyalar arası boşluk oranı
f	: Bilyalar arası boşluğu doldurma oranı, %
V_f	: Bilyalar arası boşluğun hacmi, cm^3
d_{my}	: Malzemenin yığın yoğunluğu, g/cm^3

KISALTMALAR

ASTM	: American Society Testing Materials
BKO	: Boyut Küçültme Oranı
BP	: British Petrol
DY	: Devreden Yük
GBKO	: Genel Boyut Küçültme Oranı
GDYO	: Geri Dönüş Yüğü Oranı
HGI	: Hardgroove Index
IEA	: International Energy Agency
KD	: Karıştırılmalı Bilyeli Değirmen
KGTY	: Kırıcıya Gelen Toplam Yük
LALLS	: Low Angle Laser Light Scattering
LEFM	: Linear Elastik Fracture Mechanics
LEFM	: Linear Elastik Fracture Mechanics,
NTPC	: National Thermal Power Corporation
PAI	: Pozolanik Aktivite İndeksi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

PÇ	: Portland Çimentosu
PKO	: Pülp-te Katı Oranı
SAM	: Sala Agitated Mill
SVM	: Svedala Verticle Mill
TK	: Taban Külü
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
UK	: Uçucu Kül
YBMD	: Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmen





BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde kömürün yakıt olarak kullanıldığı termik santrallerden üretilen elektrik enerjisi dünyada üretilen elektrik enerjisinin % 40'ını oluşturmaktadır. Termik santrallerde yakıt olarak kömür kullanımı diğer yakıtlara göre daha yaygındır ve bu konumunu yakın gelecekte de daha bol, ucuz ve çok geniş coğrafyalarda bulunabilmesi nedeniyle uzun yıllar koruyabileceği görülmektedir (Basu and Debnath 2019).

Dünyada kömüre dayalı termik santrallerde yılda yaklaşık 3,5 milyar ton (3656 Mt) kömür yakılmakta (BP 2017, Kurada vd.' den 2017) ve bu kömürlerin ortalama kül oranı ve kömürün yakma işleminin verimine bağlı olarak 1 milyar tondan fazla kül atık madde olarak oluşmaktadır. Kömürün yanması sonucu oluşan bu hatırı sayılır miktardaki kütle, özellikle çevre bilincinin çok gelişmediği ülkelerde hiçbir işlem görmeden ya doğrudan doğal çevreye bırakılmakta ya da önceden belirlenmiş atık sahalarında depo edilmektedir. Bu küller, genel olarak zararlı atıklar sınıfında yer almaktadırlar. Küller, yüksek ağır metal ve diğer zehirleyici kimyasal bileşik içerikleri nedeniyle doğrudan doğaya salıverilmeden depolanmaları durumunda bile çevre için önemli derecede zararlı olabilmektedirler (Chuang vd. 2018). Ayrıca, dolaylı olarak bu külün depolanması gereken atık sahaları için doğanın tahribatı söz konusu olmakta ve her yıl bu atık sahalarının genişletilmesi sorunu da giderek artmaktadır. Küllerin yeniden değerlendirilmesi ile zararlı madde içeriklerini müsaade edilen oranlarda tutmak kolaylaşır ve çevreye olan olumsuz etkileri azaltılabilir. Bir çok alanda küllerin ekonomik olarak geri kazandırılması mümkündür ancak bu anlamda en önemli uygulamaların başında çimento sektörü gelmektedir.

Puzolanik özellikteki malzemeler (puzolanlar) çok ince taneli olduklarında veya ortamdaki nemin de etkisiyle çimento gibi bağlayıcı özellik gösteren malzemelerdir. Küller, inşaat sektörünün en önemli girdi malzemesi olan çimentoya benzer özelliklere sahip, puzolanik özellikler taşıyan ve ince tane içeriğine sahip karışımlardır. Bu nedenle bu benzerlik, kömür küllerinin çimento üretiminde kullanılmalarına olanak sağlamaktadır.

Termik santral külleri, oluşumlarındaki doğal farklılığa göre iki ana grupta uçucu kül ve taban külü olarak incelenebilirler. Uçucu küller çok ince taneli oldukları için puzolanik reaksiyonlar için gerekli olan tane boyutu özelliğini doğal olarak sağlayan malzemelerdir. Bu nedenle, bir işleme ihtiyaç duymadan doğrudan çimento ile karıştırılmak üzere yaygın bir şekilde kullanılabilirler. Taban külleri ise yan ürün olarak üretildiği haliyle kendine özgü iri tane boyutu ve şekli nedeniyle doğrudan çimento yerine kullanılamaz, ancak yeterli inceliğe getirildiklerinde (öğütüldüklerinde) kullanılabilirler. Bu çalışmada, taban küllerinin de, uçucu küller gibi çimento ikamesinde kullanılabilmesi olanakları incelenmiştir.

Taban küllerinin öğütülmesi, klinker ile birlikte çimento değirmenlerinde, ya da farklı bir öğütme mekanizmasında gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, taban külünün çimento ikame şartını sağlayabilmesi için yeterli tane inceliğine getirilmesinde son yıllarda giderek önemi artan KD'lerin etkisini incelemek amaçlanmıştır ve bu nedenle de taban külünün ayrı olarak öğütülmesi ve çimentoya belli oranlarda karıştırılması yöntemi kullanılmıştır.

Termik santral küllerinin çimento ikamesi olarak kullanılması, daha az çimento kullanımına olanak sağlamaktadır. Bu da, hem daha az çimento hammaddesinin doğadan çıkarılması, hazırlanması ve pişirilmesini, hem de çimento üretimi aşamasında ortaya çıkan temel kalsinasyon ürünü olan CO₂ gazının bu ikame oranlarında azalmasını sağlamaktadır. Taban küllerinin de bu amaçla kullanılması bu olumlu etkiyi arttıracaktır. Vargas ve Halog 'un çalışmaları (2015), bu yapay puzolanik maddelerin öğütülmesinin enerji tüketimine neden olmasına rağmen klinker kullanımını azaltması nedeniyle karbon salınımını azaltmaya yardımcı olabileceğine dikkat çekmektedir (Fonteboa et al. den 2017).

Taban külünün inceliğinin KD'nin karıştırma hızı ve öğütme süresi gibi işletme parametreleri ile nasıl değiştiğini incelemek üzere öğütme deneyleri gerçekleştirilmiştir. KD öğütme ürünlerinin tane inceliğine göre çimento ikamesi olarak kullanımının belirlenmesi amacıyla puzolanik aktivite deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, puzolanik aktivite deneylerinde taban külü ile uçucu kül silis kumunun bir kıyaslaması da yapılmıştır.

Bu deneyler sonucunda, taban külünün inceliğinin artmasıyla puzolanik özelliğinin arttığı, taban külünün yaklaşık çimento inceliğine getirilmesinin, standartlara göre bu amaçla kullanılması için yeterli olduğu, çok yüksek karıştırma hızları ve uzun öğütme sürelerinde KD'de taban külü öğütme işlemlerinin çimento ikamesinde ekonomik olmadığı belirlenmiştir.

Genel olarak, bu çalışmada taban külünün imento ikame malzemesi olarak kullanılabilmesi olanakları ve durumun başta imento sektörüne ve doğaya olan katkısı incelenmiştir.





BÖLÜM 2

BOYUT KÜÇÜLTME

Boyut küçültme, genel olarak katı maddelerin parçalara ayrılması işlemidir. Cevher hazırlama işlemlerinde boyut küçültme işlemi cevherin ocaktan çıkarılmasında kullanılan patlatma işlemlerinden başlayıp, kırma ve öğütme işlemleri ile devam eden ve cevheri zenginleştirme veya endüstriyel kullanıma uygun tane boyutuna getirme aşamalarını içeren işlemlerdir.

Boyut küçültme kırma ve öğütme olarak iki temel kademede incelenmektedir. Kırma kademesi cevherin ocakta patlatılması işlemi ile başlayıp, uygun kırıcı cihazları ile devam eden boyut küçültme işleminin ilk kademesidir. Öğütme kademesi kırma kademesinin devamı olacak şekilde değirmen adı verilen ufalama cihazları ile uygulanmaktadır.

2.1 BOYUT KÜÇÜLTMENİN ESASLARI

Bir çok malzeme atomların düzenli bir şekilde dizildiği kristal oluşumlara sahiptir. Cevher minerallerinin sahip olduğu kristal düzen, mineral içerisindeki atomları birlikte tutan fiziksel ve kimyasal bağların boyut ve çeşidiyle belirlenir. Bu atomal bağlar, minerallerin kristal yapıları içerisinde yalnızca kısa mesafe etkilidirler. Bu bağların ayrılabilmesi için çekme etkisi gereklidir (Pilevneli 2003).

Kayaç içerisindeki mineraller farklı tür ve boyutta oldukları için, kayaç üzerine düzgün olarak dağılmış sabit hızda bir kuvvet uygulansa bile, içerisindeki gerilimler düzgün bir yayılım göstermez. Bir kayacın kolay kırılabilmesi o kayacın bireysel mekanik özelliklerinden çok, içerdiği mineralleri bir arada bulunduran taneler içerisindeki çatlaklar ve kusurlar önemlidir.

Kırılma dayanımı ve tek eksenli basınç dayanımı gibi standart kaya mekaniği testleri kırılma ile ilgili araştırmalar için genellikle uygun görülmez. Bu testler, sertlik ve dayanım değişkenlerini ayrı ayrı ifade etmekte ve özellikle yükleme koşulları altında kırılma için gerekli

istenen gerilimin belirlenmesi için bilgi sağlamaktadırlar. Boyut küçültmede önemli olan kavram ise, belirli bir besleme boyutundaki malzemeye uygulanan ufalama işlemi sonucu elde edilen ürünün tane boyut dağılımı ve bu ürünün istenilen boyuta getirilmesi için gerekli enerjidir (Nappier-Munn et al. 1996).

2.1.1 Tanelerin Ufalanabilirliği

Tanelerin mekanik olarak ufalanabilirliği bilgisi bir cevherin ufalama cihazında zor ya da kolay kırılması ölçüsünün ifade edilebilmesini sağlar (Pilevneli 2003). Bu ölçüyü elde edebilmek için bir takım yöntemler geliştirilmiştir. Boyut küçültme araştırmalarında, belli boyutlu bir cevherin bir cihazda istenen boyutun altına ufalanmasından elde edilen boyut dağılımı ve bu iş için harcanacak net enerjinin belirlenmesi amacı ile kullanılan başlıca yöntemler; Bond yöntemi, laboratuvar ölçekli kesikli öğütme deneyleri ve tek tane kırılımının incelenmesi yöntemleridir. Bu yöntemlerin kullanılması ile, enerji-boyut küçültme eşitliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu eşitliklerin dikkatli bir şekilde belirlenmesi, boyut küçültme için uygun cihaz seçimi, devre tasarımı ve iyileştirilmesinde çok önemlidir.

2.1.2 Cevherin Mekanik Özellikleri

Bir cevher kayacının boyut küçültme işlemi ile kırılması o kayacın uygulanan yük altında nasıl tepki verdiğine bağlıdır. Kayacın bu yüklere verdiği tepkiler iki ana grupta incelenebilir. Bunlar makro ölçekli tepkiler ve kayacın mikroçatlak mekanizmasıdır.

Makro ölçekli tepkiler maksimum çekme dayanımı, basma dayanımı ve kayacın uygulanan yüke karşı deformasyon davranışlarını ifade eden Young modülü ve Poisson oranı gibi özelliklerdir. Mikroçatlak mekanizmaları ise kayaç içerisindeki çatlakların oluşmaya başlaması ve ilerlemesini içermektedir (Nappier-Munn et al. 1996).

İdeal boyutlarda hazırlanmış bir silindirik kayaç örneğinin tek eksenli basınç yüklemesi altında içerisindeki mevcut mikro çatlakları ve gözenekleri kapanır. Bu arada hem mikro çatlaklarda ilerleme olurken hem de yeni mikro çatlaklar oluşur. Böylece çatlaklar büyür ve aralarında çatallaşmalar oluşur. Bunun sonucunda makro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yüzey alanı öyle bir kritik noktaya ulaşır ki bu noktadan sonra kayaç örneği yüklemeye karşı tepki gösteremez ve kırılır. Kırıldığı andaki yükleme kuvvetinin, o kayaç örneğinin kuvvete dik kesit alanına

oranı o kayacın dayanım değerini verir. Yükleme kuvveti, baskı yönünde ise tek eksenli basınç dayanımı, çekme yönünde ise çekme dayanımını değerini verir.

Silindirik kayaç örneğinin uygulanan birim yüke karşı uzamasının ölçüsü Young (elastisite) modülü olarak ifade edilirken, bu örneğin çapındaki değişimin boyunun uzamasına oranı da Poisson oranıdır.

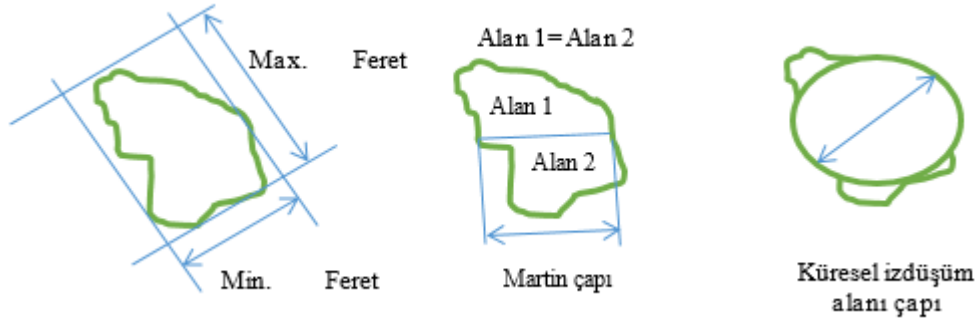
Kayacın mikro ölçekteki özellikleri, kayacın yükleme karşısındaki tepkisinden yararlanarak kırılma mekanizmasını kontrol etmektedir. Kayacın yüklemeye karşı tepkisi ve kayaç içerisindeki çatlak ilerlemesini araştırmanın temelleri Griffith'in çalışmalarına dayanmaktadır. Griffith, düşük çekme dayanımına sahip bünyesinde boydan boya bozuk para şekilli çatlaklar içeren bir cam örneğini incelemiştir. Daha sonra onun çalışmalarını devam ettirenler bu varsayımı kabul etmişler ve sonunda bu kabuller kırılma mekanizması ve daha da ilerlemiş şekliyle doğrusal elastik kırılma mekanizmasının (LEFM) gelişmesine yol açmıştır. Bu mekanizma, yükleme yapılan her bir çatlağın uç noktasında bir gerilim yoğunluğu faktörü (K_I) olduğunu varsaymaktadır. Malzeme, kırılma tokluğu olarak da bilinen kritik bir gerilim yoğunluğuna (K_{IC}) sahiptir. Bu kayacın kendine özgü kritik bir çekme dayanımı değerine (kapasitesinin) sahip olmasına benzetilebilir. Çatlak ucundaki K_I faktörü, K_{IC} değerini geçtiğinde ($K_I \geq K_{IC}$) kırılma işlemi gerçekleşir.

2.2 BOYUT KÜÇÜLTMEDE TANE BOYUTU KAVRAMI

Boyut küçültme işlemleri sonucunda elde edilen taneler çok sayıda ve düzensiz şekillidirler. Düzensiz şekilli tek tanelerin boyutlarının tanımlanması için nominal çap kavramları geliştirilmiştir. Bu çap kavramları, özellikle ince tane boyutu analizlerinde taneciklerin çökme hızları, mikroskopik olarak sayılması ya da kayaçların dokusal özelliklerinin belirlenmesinde doğrudan kullanılan çap kavramları olmakla beraber boyut gruplarındaki taneciklerin isimlendirilmesi için de yardımcı niteliğindedirler.

Sadece düzenli geometrik şekiller tanımlanabilen boyutlara sahiptirler. Bir küre, tek bir sayıyla yani çapı ile tanımlanabilen tek şekildir. Üç boyutlu bir taneciğin boyutunu tanımlamak için onu bir küreye gönderme yaparak değerlendirme (eş değer küre teorisi) taneciklerin birbirine göre karşılaştırılmasını kolaylaştıracaktır (URL-1). Bu bilgiler özellikle mühendislere büyük bir öngörü sağlamaktadır.

En önemli nominal çap kavramları Martin, Feret ve izdüşüm alan çaplarıdır ve Şekil 1’de cevher içerisinde rastgele bir tanenin Martin, Feret ve izdüşüm alanı çapları ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Bir tanenin martin, feret ve küresel izdüşüm alanı çaplarının gösterimi.

Feret çapı tek bir taneciğin izdüşümü kenarlarına teğet, izdüşüm alanı içinden geçmeyen ve birbirlerine paralel olan iki doğru arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir. Bu durumda en büyük ve en küçük feret çapları kavramları ortaya çıkar. Martin çapı, taneciğin izdüşümü alanını iki eşit parçaya bölen doğrunun boyudur. Küresel izdüşüm çapı taneciğin izdüşüm alanına eşit alana sahip dairenin çapıdır.

Tane boyutunun kontrolü, aşırı ufalama ile gereksiz enerji tüketimini engellediği gibi, öğütmenin yeterli bir şekilde yapıp yapılmadığının tespitini mümkün kılar (Özdağ 1992). Böylece, boyut küçültme araçlarının tasarımı hassas bir şekilde yapılabildiği gibi, kapasitelerinin de verimli kullanılması sağlanmaktadır. Tane boyutu ve şekli, tane boyutu analizleri ile tespit edilir. Bu analizler ile tek bir tanenin boyutu ya da taneler topluluğunun ortalama boyutu hesaplanabilir. Genel olarak cevher hazırlama ve boyut küçültme işlemlerinde malzeme içindeki tanelerin sayısı tek tek sayılamayacak kadar çoktur ve bu nedenle tane boyutu analizlerinde malzemenin içindeki her bir tanenin boyutu ayrı ayrı ölçülemeyeceğinden malzemeler birbirine yakın ve genellikle $\sqrt{2}$ oranında değişen açıklıklardaki laboratuvar elek serileri kullanılarak sınıflara ayrılır. Bu sınıflara boyut grupları adı verilir. Bu boyut gruplarındaki malzeme miktarlarının farklı yüzde ağırlıklarının çeşitli şekillerde değerlendirilmesi ile malzemenin boyut dağılımlarını veren histogramlar elde edilir. Tek bir tanenin boyutu yerine bu histogramlar sayesinde dar tane boyut gruplarının ortalama boyut değerlerini hesaplamak, boyut küçültme işlemi için daha kullanışlıdır. Burada sınıflandırma

işlemi genelde 38 μm 'ye (400 mesh) kadar olan tane boyları için standart laboratuvar elekleri kullanılarak yapılırken, bu boyuttan daha ince tane boyutları için çeşitli boyut analizi yöntemleri kullanılır. Bunlar; sedimantasyon ve elütrasyon teknikleri, mikroelek, mikroskop, elektriksel direnç ve ışın saçınımı olarak sınıflandırılabilir (Saklara vd. 2000). İnce öğütmeye olan ihtiyacın artması ile 38 μm 'den çok daha ince boyutlara sahip öğütme ürünlerine ve dolayısıyla ince taneler için gerekli olan bu analiz yöntemlerine de ihtiyaçlar artmaktadır. İnce taneler için kullanılan bu yöntemlerde analizi yapılan örnek, elekler ile yapılan örneklere göre çok daha az miktardadır. Bu nedenle, bu yöntemlerde malzeme boyut gruplarının yüzde miktarlarından çok tek tane boyutları önem kazanmaktadır. Bunun için tek tanelerin de boyutlarının tanımlanması ihtiyacı vardır.

Çok sayıda tanelerden oluşan boyut küçültme ürünlerinde birbirlerine yakın boyutta olanları gruplara ayırarak incelemek boyut küçültme işlemlerinin karşılaştırılması ve değerlendirilmesi için çok önemli kolaylıklar sağlar. Bu boyut gruplarını tane boyutlarına göre isimlendirmek gereklidir. Buna göre açıklıklarına göre büyükten küçüğe doğru üst üste sıralanmış iki elek arasında kalan boyut grubu içindeki en büyük olan tane iriliği büyük olan eleğin açıklığı ile en ince tane iriliği ise küçük olan eleğin açıklığı ile ifade edilir. Eğer tek bir elek kullanıldıysa bu elekten geçen taneler içinde en büyük tane boyutu bu eleğin açıklığını gösterir en ince tane ise bu tek eleğin açıklığından ince bütün boyutlardaki positif gerçel sayı değerlerinde olabilir. Örneğin -2 cm'lik malzeme en iri tane boyutu 2 cm olan ve diğerleri 2 cm'den küçük her boyuta sahip tanelerden oluşan bir malzemedir. Benzer olarak -1+0,5 mm'lik boyut grubu, en iri boyutu 1 mm (1 mm altı) ve en ince boyutu 0,5 mm (0,5 mm üstü) olan tanelerden oluşan tane boyutu olarak ifade edilmiş olur.

2.3 BOYUT KÜÇÜLTME ORANI KAVRAMI

Boyut küçültmede tane boyutu ile ilgili bir diğer önemli kavram ise boyut küçültme oranıdır (BKO). BKO, kırma veya öğütme işlemine giren (beslenen) cevherin en iri tane boyutunun, işleminden çıkan cevherin (ürün) en iri tane boyutuna oranı olarak tanımlanmaktadır.

Kırma ve öğütme kademeleri istenilen tane boyutuna bağlı olarak birden fazla aşamada yapılabilmektedir. Kırma işlemindeki her bir boyut küçültme aşaması için BKO değeri 3 ile 8 arasında değişirken, öğütme işleminde 5 ile 20 arasında olabilmektedir. Çeşitli boyut küçültme kavramları mevcuttur. Cevher içindeki en iri tane temel alınarak hesaplamalar yapıldığında eğer

buradaki en iri tanelerin sayısı çok az veya fazla olursa ufalama cihazlarının tasarlanmasında ve kapasite hesaplamalarında boyut dağılımındaki düzensizliğe bağlı olarak hatalar olabileceği için, malzemelerin yüzde ağırlık olarak % 80'inin geçebildiği teorik elek açıklığı boyutu (d_{80} , mm) dikkate alınır. Malzemenin boyut dağılımına göre malzemenin % 50'sinin geçtiği teorik elek açıklığı olan ortalama tane boyutu da (d_{50} , mm.) ufalama cihazlarının BKO'larının hesaplanmasında kullanılan teorik boyutlardır. Buna göre ufalama cihazları için en yaygın BKO hesaplamaları Eşitlik 2.1,2.2 ve 2.3'de belirtilmiştir.

$$BKO = \frac{db_{max}}{dü_{max}} \quad (2.1)$$

$$BKO = \frac{db_{80}}{dü_{80}} \quad (2.2)$$

$$BKO = \frac{db_{ort}}{dü_{ort}} = \frac{db_{50}}{dü_{50}} \quad (2.3)$$

db_{max} : Besleme malı içindeki en büyük tane boyutu.

$dü_{max}$: Ufalama ürünü malzeme içindeki en büyük tane boyutu.

db_{80} : Besleme malı içindeki malzemenin ağırlıkça % 80'inin geçtiği teorik tane boyutu.

$dü_{80}$: Ürün içindeki malzemenin ağırlıkça % 80'inin geçtiği teorik tane boyutu.

db_{ort} : Besleme malı içindeki malzemenin ağırlıkça % 50'sinin geçtiği teorik tane boyutu.

$dü_{ort}$: Ürün içindeki malzemenin ağırlıkça % 50'sinin geçtiği teorik tane boyutu.

Boyut küçültmenin bu iki temel kademesi çoğu zaman tek kademede kendilerinden istenen tane boyutunu sağlayamazlar. Bu nedenle bu temel kademeler de kendi içlerinde istenen tane boyutunun giderek azaldığı ardışık alt kademelere (iri kırma, ince kırma veya iri veya ince öğütme) sahiptir.

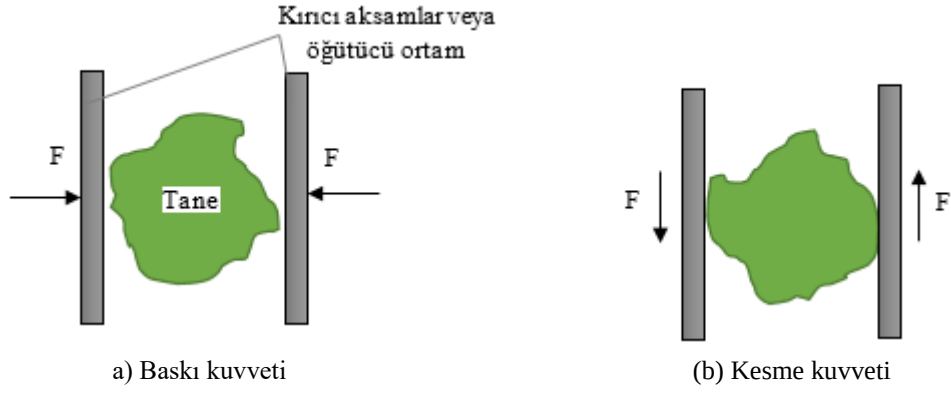
Kırma kademesinde en iri tane boyutu 2 m'ye kadar varabilen cevher taneleri grubu, maksimum boyutu 2 cm olan taneler grubuna dönüştürülecek şekilde ufalanmaktadır. Bu işlem genellikle en az iki farklı kırma kademesi ile yapılmaktadır. Öğütmede, aynı şekilde bu boyut değişimi 2 cm'den bir kaç µm boyutuna gelecek şekilde öğütülmekte ve boyut küçültme işlemi tamamlanmaktadır. Öğütme işlemi de birden fazla kademede yapılabilir. Kırma kademesi

neredeyse tamamen kuru şekilde yapılırken, öğütme kademesi cevherin boyut küçültme sonrasındaki işlemin ihtiyacına göre yaş veya kuru olarak uygulanabilmektedir (Gaudin 1939).

2.4 BOYUT KÜÇÜLTMEDE ETKİN OLAN KUVVETLER

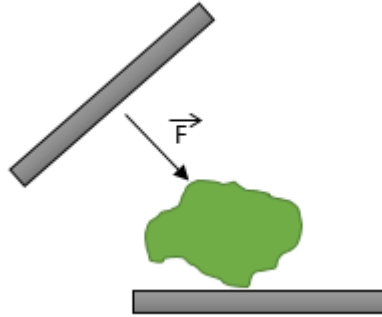
Boyut küçültme cihazına verilen elektrik enerjisi cihazın motoru ile mekanik enerjiye dönüşür. Mekanik enerji en başta değirmenin gövdesi vasıtasıyla öğütücü ortamın (bilya, çubuk, çakıl) ya da doğrudan kırma aksamının (çeneler, çekiçler, konik kırıcı kafalar, merdane, valsler, karıştırıcılar) kinetik enerji kazanmasını sağlar. Kırma aksamı veya öğütücü ortam, yüzeyleri vasıtasıyla kazandığı kinetik enerjiyi tanelere iletir. Öğütmede etkin olan bu öğütücü yüzeylerin taneleri zorlama şekilleri ufalama cihazının çeşidine bağlıdır. Boyut küçültmenin doğasının iyi anlaşılabilmesi, bu zorlama şekillerinin iyi anlaşılmasına bağlıdır.

Tanelerin boyut küçültme cihazında karşılaştığı zorlama şekilleri baskı, darbe, kesme, çarpma veya vurma şeklinde olabilir. Genellikle bu kuvvetlerin bir kaçı beraber tane üzerinde etkili olabilir (Wills 1985, Ergin vd. 1999, Samanlı'dan 2008). Genellikle bu kuvvetler birlikte taneler üzerinde etkili olsa da her bir boyut küçültme cihazının öğütülecek tane üzerinde etkin olduğu bir zorlayıcı kuvvet vardır. Örneğin baskı kuvveti çeneli ve merdaneli kırıcılarda, biri sabit diğeri hareketli ve kinetik enerjiyi aktaran iki öğütme aksamı arasında baskı kuvveti etkindir. Nispeten düşük olan baskı kuvvetleri yanında daha büyük ve ters ve paralel yönde etkiyen kuvvetler kesme kuvvetleridir. Kesme kuvvetinin etkin olduğu ufalama cihazları kahve ve un değirmenleridir. Ayrıca bilyalı ve çubuklu değirmenlerin kaskat çalışma koşullarında etkin olan kuvvetler kesme kuvvetleridir. Kesme kuvveti karıştırmalı değirmenlerde de aşındırma kuvveti ile birlikte en baskın kuvvetlerden biridir. Şekil 2.2'de baskı ve kesme kuvvetlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2 Ufalamada baskı ve kesme kuvveti yoluyla zorlamanın şematik gösterimi.

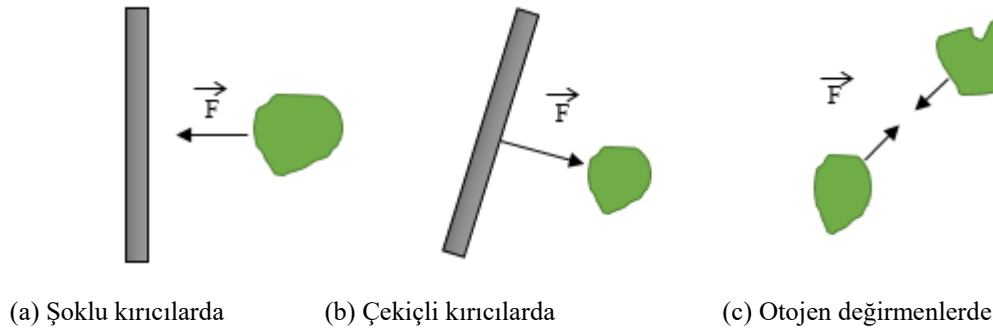
Bir çok ufalama cihazında etkin olan kuvvetlerden biri de darbe kuvvetidir. Örneğin konik kırıcılarda olduğu gibi öğütme aksamı tane üzerine kinetik enerjisini darbe kuvveti ile iletmektedir veya bilyalı ve çubuklu değirmenlerde öğütücü ortamın tane üzerine serbest düşmesi ile (katarakt çalışma koşullarında) tanelere darbe kuvveti uygulanır. Yüksek hızlı öğütücü aksam taneye çarparak boyut küçültmeyi meydana getirir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002). Şekil 2.3’de darbe kuvvetlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3 Ufalamada darbe kuvveti etkisinin şematik gösterimi.

Çarpma kuvveti ise yüksek kinetik enerji kazandırılmış tanenin ya birbirine, ya da sabit bir kırma aksamına çarpması ile gerçekleşir. Otojen değirmenler ve darbeli kırıcılarda görülen yaygın bir kuvvettir. Ancak, diğer zorlama çeşitlerinden farklıdır. Bunun nedeni çarpma sonucu oluşturulan kinetik enerji aktarımı malzeme içerisinde şok etkisi yaptığı için taneler zayıf olan tane sınırları boyunca parçalanma eğilimini daha fazla göstermektedir. Bu nedenle seçici bir ufalama oluşturur (Önal ve Ateşok 1994). Otojen değirmenlerde cevher tanelerinin birbirine çarpması, çekiçli kırıcılarda kırıcı yüzeylerin tanelere çarpması ve şoklu kırıcılarda cevherin

kırıcı yüzeylere çarptırılması ile oluşur. Şekil 2.4’ de bu üç etkinin şematik görünümü gösterilmiştir.



Şekil 2.4 Boyut küçültme işleminde oluşan çarpma kuvveti şekilleri.

2.5 BOYUT KÜÇÜLTME TEORİLERİ

Bilimsel temelde BKO ile boyut küçültmede harcanan enerji arasındaki ilişkinin kurulması için bir çok ampirik ya da bilimsel yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımların tamamı belirli bir ufalama cihazı ile kesikli öğütme deneylerinden elde edilen ürünün farklı boyut dağılımı grafiklerinin gözlemlenmesi esasına dayalıdır. Öğütmede harcanan özgül enerji (E , J/kg) değirmene öğütme için verilen toplam enerji girdisinin (E_{top} , J) değirmen içinde anlık olarak bulunan malzeme miktarına (W , kg) oranı olarak hesaplanabilir. Bu boyut dağılımı gözlemlerine ilave olarak genel özgül enerji yaklaşımı makul bir doğruluk payı ile özgül enerji ve boyut küçültme arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmada etkilidir ve sıklıkla kullanılmaktadır (Austin et al. 1984). Tüm boyut küçültme yaklaşımları Eşitlik 2.4’deki genel formül ile gösterilebilir.

$$E = \frac{M_p t}{W} = C_x [X_{(p)} - X_{(f)}] \quad (2.4)$$

E : Boyut küçültmede harcanan özgül enerji, kWh/ton.

M_p : Değirmenin boş ve dolu çalışma koşulları arasındaki güç farkı (Net güç), kW.

T : Süre, h(saat).

W : Öğütme cihazındaki anlık malzeme miktarı, ton.

C_x : Öğütmede özgül enerji hesabında deney sabiti.

$X_{(p)}$: Ürünün tane boyutuna bağlı fonksiyon.

$X_{(f)}$: Besleme tane boyutuna bağlı fonksiyon.

Bazı yaklaşımlar temel olarak kabul edilmiş ve öğütme kanunları olarak değerlendirilmişlerdir. En önemli öğütme kanunları Rittinger, Kick ve Bond kanunlarıdır.

2.5.1 Rittinger Kanunu

Enerji ve boyut küçültme arasındaki ilişki üzerine oluşturulan ilk yaklaşımlardan biri Rittinger Kanunudur. Bu yaklaşıma göre, bir malzemenin kırılması için gerekli enerji o malzemenin birim kütlesinin sahip olduğu yüzey alanının (m^2/kg) kırılma sonucu meydana gelen artışı ile ilişkilidir. Bu yaklaşımın ifadesi basitçe Eşitlik 2.5’de belirtilmiştir.

$$\text{Özgül Enerji} = \gamma[S(p) - S(f)] \quad (2.5)$$

γ : Kırılan malzemenin birim yüzey alanı başına düşen yüzey enerjisi, J/m^2 .

$S(p)$: Ürünün birim yüzey alanı, m^2 .

$S(f)$: Besleme malı birim yüzey alanı, m^2 .

2.5.2 Kick Kanunu

Bir diğer yaklaşım Kick tarafından 1883 yılında oluşturulmuştur. Bu yaklaşım kırılan malzemenin tane boyutu ve kırılması ile gerilim enerjisi arasındaki çok basitleştirilmiş bir ilişkiyi kullanmaktadır. Ufalama için gerekli olan enerjinin boyut küçültme oranı (X_f/X_p) ile doğru orantılı olduğu düşüncesinden doğan bir yaklaşımdır. Basitçe Eşitlik 2.6’ deki formül ile tanımlanabilir.

$$E_K = K_k \log\left(\frac{X_f}{X_p}\right) \quad (2.6)$$

E_k : Malzemenin birim kütlesi başına X_f boyutundaki tanelerinin boyutunu X_p boyutuna indirmek için gerekli özgül gerilim enerjisi, (J/kg).

K_k : Kırılan malzemenin birim kütlesi başına tane boyutunun 1/10 oranında kırılması için gerekli özgül gerilim enerjisi (J/kg).

X_f : Besleme malı tane boyutu.

X_p : Ürün tane boyutu

Gerçek bir ufalama olayı tek bir tane üzerinde olmayacağı için besleme ve ürün malzemelerinin % 80'inin geçtiği elek açıklığı boyutları kullanılmaktadır. Kick yaklaşımındaki K_k özgül enerji değeri tereddütlü bir durumdur. Bunun nedeni değirmene verilen enerjinin tamamının tanecik içerisinde gerilim enerjisine dönüştüğü varsayılmaktadır. Bu doğru bir yaklaşım değildir ve sonraki sayısız incelemede böyle olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu tereddütlü durumun aşılması için Austin (1973) Eşitlik 2.5'deki yaklaşımı yaptığı çalışmada düzenlemiştir. Özgül enerjinin BKO ile ilişkisi K_k yerine C_k özgül enerji katsayısı ile hesaplanır ve laboratuarda yapılan kesikli deneyler ile C_k katsayısı bulunabilir. Bu katsayının gerçek ölçekli değirmenler içinde kullanılabileceği düşüncesiyle öğütme için harcanacak enerjinin hesabı yapılabilir. Bu oran Eşitlik 2.7'de gösterilmiştir.

$$E_K = \frac{M_p t}{W} = C_k \log\left(\frac{X_f}{X_p}\right) \quad (2.7)$$

Değirmen gücünün değişmediği varsayılır. Böylece, öğütme süresi ile değirmen ürünün X_p değerinin azaldığı ve bu durumda da $\log(1/X_p)$ değerinin arttığı şeklinde de basitçe ifade edilir. Bu yaklaşım iri boyutta öğütme için uygun sonuçlar vermektedir. Ancak ince boyutlarda öğütme sonuçlarını tanımlamakta iyi değildir.

Rittinger ve Kick'in öğütme kanunları sırasıyla ince ve iri boyutta öğütme için kabaca yaklaşık sonuçlar verebilmektedir. Bu kanunlar öğütmede enerji boyut küçültme ilişkisini araştırmanın temellerini oluşturmaktadır. Boyut küçültme ile ilgili araştırmalarda bu iki kanunun ortaya çıkması ve bunların yukarıda belirtilen hatalı taraflarının iyi kavranması çok önemlidir.

2.5.3 Bond Kanunu

Rittingerin birim yüzey alanı artışı ile Kick'in BKO artışını birleştiren ve Griffith'in çatlak teorisini kullanan bir üçüncü yaklaşım da 1952 yılında Bond tarafından geliştirilmiştir. Bu yaklaşıma göre malzeme içerisindeki çatlak uzunluğunun değişimi harcanan enerji ile orantılıdır. Bu durum şu şekilde izah edilebilir. Malzeme içerisindeki X boyutlu tanelerin çatlak uzunluğu, toplam yüzey alanı (x^2), tane hacminin geometrik ortalaması (x^3) ve aynı zamanda

da malzeme içerisindeki tane sayısı ile doğru orantılıdır. Malzeme içerisindeki tane sayısı ise tane hacmi (x^3) ile ters orantılıdır. Bu bilgileri birleştirdiğimizde Eşitlik 2.8’ deki orantısal yaklaşım elde edilebilir.

$$E_B = \frac{\sqrt{X^2 X^3}}{X^3} = \frac{1}{X^{0,5}}, (Teorik Çatlak Uzunluğu) \quad (2.8)$$

Bu yaklaşım ile öğütmede harcanan enerjinin genel ifadesi laboratuardaki kesikli öğütme testleri sonuçlarına dayalı olarak Bond yaklaşımının genel ifadesi Eşitlik 2.9’da belirtilmiştir.

$$E_B = C_B \left(\frac{10}{X_p^{0,5}} - \frac{10}{X_f^{0,5}} \right) \quad (2.9)$$

Bu genel ifadedeki C_B katsayısı Bond yaklaşımına özgü iş indeksi (kWh/Ton) olarak kabul edilen ve malzemelerin boyut küçültmeye karşı gösterdiği direnci genel olarak ifade eden bir katsayıdır. Bond, bu malzemeye göre değişen katsayıyı “sınırsız büyüklükteki parçalardan meydana gelen bir malzemenin birim miktarının % 80’inin 100 μ m boyutu altına kırılacak şekilde ufalanması için gerekli enerji” olarak tarif etmiştir. Katsayının malzemenin malzemeye değişen özel ifadesi W_i şeklinde kullanılır. Buna göre Bond kanunun farklı malzemeler için düzenlenmiş özel formülü Eşitlik 2.10’de gösterilmiştir.

$$E_B = W_i \left(\frac{10}{X_p^{0,5}} - \frac{10}{X_f^{0,5}} \right) \quad (2.10)$$

E_B = Öğül enerji (kWh/ton), W_i = İş indeksi (kWh/ton), X_p = Öğütülmüş Ürünün % 80’inin geçtiği elek açıklığı boyutu, X_f = Öğütülecek ürünün % 80’inin geçtiği elek açıklığı boyutu, formüldeki 10 değeri de iş indeksi tanımındaki 100 μ m’luk X_p boyutunu sadeleştirmek için gerekli kare köklü ifadenin değeridir ($100^{0,5} = 10$).

Walker et al. (1937), öğütme kanunlarının genel bir kanun ile birleştirilmesi düşüncesini ilk defa ortaya atmışlardır (Austin et al.’dan1984). Bu yaklaşımın genel matematiksel ifadesi Eşitlik 2.11’de verilmiştir.

$$d_E = -C_m \left(\frac{d_X}{X^n} \right) \quad (2.11)$$

Bu ifade içerisindeki X tane boyutu tek bir tanenin boyutu olduğu için, Austin (1973) tek bir tanenin diferansiyel değişiminin anlamsızlığını ifade etmiş ve bunun yerine X_{ort} boyut kavramını bu genel ifadeye uyarlamıştır. Buna göre, Walker et al. (1937) ifadesinin doğru hali Austin (1973) tarafından düzenlenmiş ve Eşitlik 2.12’de gösterilmiştir.

$$d_E = -C_m \left(\frac{d_{X_{ort}}}{X_{ort}^n} \right) \quad (2.12)$$

Bu düzeltilmiş ifadede, $n = 1$, $n = 2$ ve $n = 1,5$ değerleri kullanılıp diferansiyel denklem çözülürse, sırasıyla Kick, Rittinger ve Bond kanunlarının enerji boyut küçültme ilişkilerinin matematiksel ifadeleri elde edilmektedir. Ancak X yerine X_{ort} boyutu kullanıldığında, Kick ve Rittinger kanunları için bazı düzenlemeler yapıldıktan sonra, diferansiyel denklem bu kanunları verebilirken, Bond kanunu için genellikle uyuşma göstermez. Bu durumu aşmak için bu genel kanunda X yerine malzemenin % 80’inin geçtiği elek açıklığı (X_p) kullanıldığında ise Kick ve Rittinger kanunları ile uyuşmamaktadır. Böylece bu genel kanunun Eşitlik 2.13 ve 2.14’ deki şekilleriyle kullanılmaları uygundur.

$$E = \left(\frac{C_{80}}{n-1} \right) \left(\frac{1}{X_p^{n-1}} - \frac{1}{X_f^{n-1}} \right), n = 1,5 \text{ veya } 2 \text{ (Bond veya Rittinger kanunu için)} \quad (2.13)$$

$$E = C_{80} \left(\frac{X_f}{X_p} \right), n=1 \text{ (Kick kanunu için)} \quad (2.14)$$



BÖLÜM 3

KIRMA İŞLEMİ VE KIRICI CİHAZLAR

Kırma işlemi, boyut küçültmenin ilk ana kademesidir. Ocaktan çıkan ve bazen boyutları 1,5 ya da 2 m'ye ulaşabilen tüvenan cevher ya da kömürün ya doğrudan endüstrinin kullanım alanına ya da boyut küçültmenin ikinci kademesi olan öğütmeye hazırlık için uygun bir kaç cm boyutuna ufalanması için yapılır. İlk aşamada kayaç kütlesinin kırılması delik delme ve patlatma işlemi ile başlar. Bu işlemi kırıcı tesislerinde kayaç kütlesinin ortalama tane boyutunu azaltma işleminin yapılması için gerekli iri boyutta kırma işlemi takip eder.

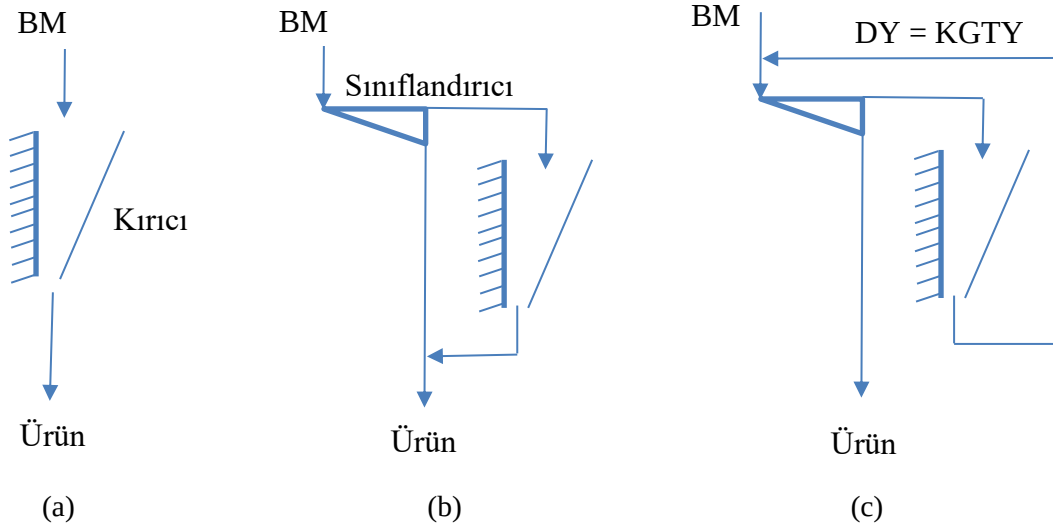
Tek bir kademede büyük boyutlu taneleri bir kaç cm boyutuna ufalamak günümüz teknolojisinde imkansızdır. Bu yüzden kırma işlemi genellikle bir kaç kademede yapılır. Bu kırma kademelerinin ayrı ayrı BKO oranlarının çarpımları genel boyut küçültme oranı (GBKO) olarak kabul edilir. Ocaktan gelen ham cevher üzerinde yapılan ilk kırma kademesi birincil kırma işlemi olarak adlandırılır. Bu kademeyi ikincil, üçüncül hatta gerekiyorsa dördüncül kırma kademeleri takip eder.

Kırma işlemi kırıcı olarak adlandırılan cihazlar ile yapılır ve her bir kırma kademesinde farklı tür kırıcı cihazlar kullanılır. Kırıcılar, kırma işleminin kademelerine göre birincil, ikincil, üçüncül kırıcılar olarak gruplandırılırlar. Birincil kırıcılar olarak cevher hazırlama işlemlerinde döner kırıcılar, çeneli kırıcılar ve darbeli kırıcılar kullanılmaktadır. İlerleyen kırma kademelerinde ise daha çok konili ve merdaneli kırıcılar kullanılmaktadır.

Boyut küçültmede birincil kırma kademesinden sonraki kademelerdeki kırıcılar, bir önceki kırma kademesi işleminden kırılarak gelen cevheri besleme olarak kabul eder. Cevherin taşınması ve kırıcılara beslenmesi için gereken donanım birincil kırıcılara göre daha hafiftir. Nadiren olsa, örneğin cevherin maksimum tane boyutu 50-60 cm boyutlarını geçmiyorsa genelde ikinci kademe kırma cihazı olarak görülen bir kırıcı cihaz birincil kırma için kullanılabilir. Birincil kırma ifadesi cevhere uygulanan ilk kırma işlemi belirtir.

Kırıcılar açık veya kapalı devre olarak çalıştırılabilir. Açık devre sistemler, kırılacak Besleme malının (BM) kırıcıdan bir kere geçirilmesi ile kırıldığı sistemlerdir. Bu sistemlerde kırılacak malzemenin tamamı doğrudan kırıcıdan bir kere geçirilerek kırılabileceği gibi, malzemenin içerdiği ince malzemenin gereksiz ve aşırı ufalanmasını önlemek için kırıcı öncesinde elek ya da ızgara gibi bir sınıflandırıcıyla birlikte de çalıştırılabilirler.

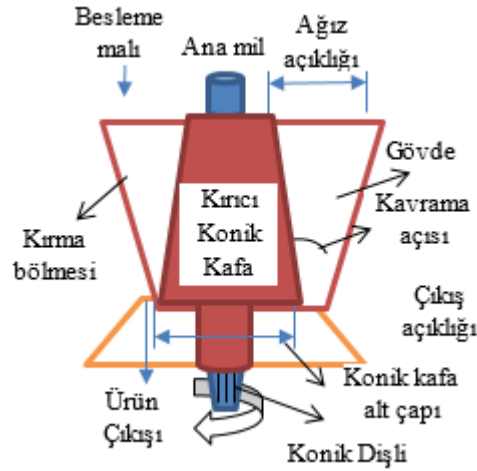
Kapalı devre ise, kırma ürünü içerisinde belirli bir tane boyutunun üzerindeki malzemenin tamamının istenen boyutun altına geçinceye kadar kırıcıdan geçirildiği kırma devreleridir. Tane boyutunun kontrolü için kırıcı öncesinde ya da sonrasında bir elek kullanılmaktadır. Bu nedenle kapalı devrede, sınıflandırıcıdan kırıcıya sürekli bir devreden yük (DY) söz konusu olmakta ve kırıcıya gelen toplam yükte (KGTY) ve dolayısıyla kırıcı kapasitesinde artış meydana gelmektedir. Böylece, aynı kapasitede aynı tane inceliğine ulaşmak için kapalı kırma devrelerinde açık kırma devrelerine göre daha az enerji tüketilmektedir. Elekler malzemenin aşırı ufalama ve gereksiz enerji tüketimini önlemek için genellikle kırıcı öncesinde kullanılmaktadır. Kapalı devre, kırma işleminin son kademesinde kullanılırken, açık devre ise önceki kırma kademelerinde kullanılır. Şekil 3.1 (a) ve (b)'de sırasıyla sınıflandırıcısız ve sınıflandırıcılı açık devre, (c)'de ise kırma öncesi sınıflandırmanın yapıldığı kapalı kırma devresi şematik olarak gösterilmiştir.



3.1 DÖNER KIRICILAR

Döner kırıcılar, birincil kırma kademesinde kullanılır ve cevher hazırlamada jirator (gyratory) kırıcılar olarak da isimlendirilirler. Kırma işleminde yüksek kapasitenin önemli olduğu durumlarda kullanılırlar. Üç ana parçadan oluşurlar. Bunlar ana mil, kırıcı kafa veya göbek, kesik koni şeklinde gövde. Döner kırıcılar kırıcı üst açıklığı ve kırıcı konik kafanın alt yüzeyi çapına göre adlandırılırlar. Örneğin 400x700 mm'lik bir döner kırıcı için, kırıcı ağız açıklığı 400 mm, kırıcı konik kafa alt çapı 700 mm'dir. Kırıcı milin bağlı olduğu eksantrik yatak motora bağlı konik-dişli ile hareket ettirilir. Kırıcı mil üzerine monte edilmiş kırıcı konik kafa (gövde) kendi eksenini etrafında serbest bir şekilde dönebilecek şekilde yataklanmıştır ve bu hareketle kırma işlemini gerçekleştirir.

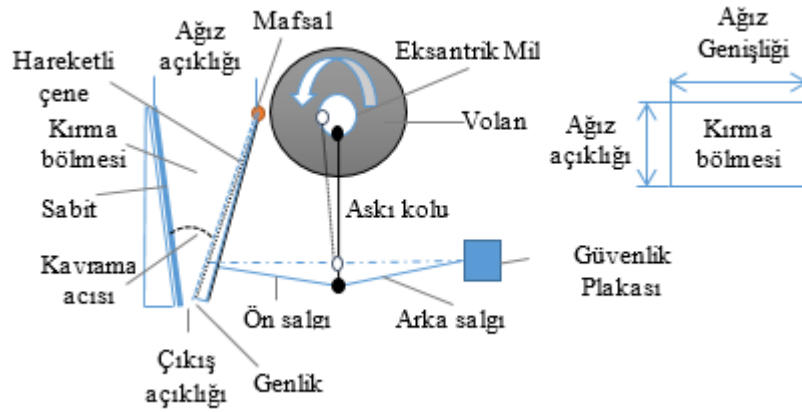
Döner kırıcılarda BKO 4:1 ile 10:1 arasında değişmektedir. Kırıcının çıkış ağzındaki açıklık kırılacak malzeme boyutunu belirlemektedir. İstenilen kırma boyutu, kırıcı milinin aşağı ya da yukarı hareketi ile ayarlanmaktadır. Kırıcı ürünün en üst tane boyutu 10-16 cm arasında değişir. Kırıcı konik kafa ile gövde arasındaki kavrama açısı 25° ile 30° arasında değişmektedir. Kavrama açısı besleme üst boyutunu belirleyen bir faktördür. Şekil 3.2'de bir döner kırıcı kesiti ve isimlendirmede kullanılan cihaz boyutu değişkenleri verilmiştir.



Şekil 3.2 Döner kırıcı kesiti.

3.2 ÇENELİ KIRICILAR

Çeneli kırıcılar, birincil kırma kademesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek kapasite elde etmek yerine büyük cevher bloklarının kırılması öncelikli ise kullanımları tercih edilir. Çeneli kırıcılarda biri sabit diğeri hareketli iki çene bulunmaktadır. Hareketli çeneye verilen hareketle kırıcıya beslenen malzeme çeneler arasında sıkıştırılıp baskı kuvveti ile kırılır. Hareketli çenenin salınım sayısı 180-250 salınım/dk, daha ince boyutlu kırma istenirse bu oran 275-400 salınım/dk olabilir. Çeneli kırıcılar ağız açıklıkları ile tanımlanır. Çenelerin oluşturduğu ağız açıklığının eni ve boyu ile ifade edilmektedirler. Kırıcı ağız açıklığının genişliği 800 mm, boyu 1000 mm olan bir çeneli kırıcı 800x1000 mm'lik bir kırıcı olarak tanımlanır. Çeneli kırıcılarda 2 m tane boyutunun üzerinde bile besleme yapmak mümkündür (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002). Ağız genişliğinin % 80'inden daha büyük boyutlu tanelerin kırıcıya beslenmesi uygun değildir. Kapasiteleri 750 ton/saat' BKO değeri 4:1- 9:1 arasında değişmektedir. Çeneler arasındaki kavrama açısı 19-25° arasındadır. Çeneli kırıcılar hareketli çenelerinin kırıcı gövdesine yataklanma (mafsal konumu) şekillerine göre Dodge tipi (alttan mafsallı), universal tip (ortadan mafsallı) ve Blake tipi (üstten mafsallı) olmak üzere üç gruba ayrılır. Günümüzde ilk iki grup sanayi ölçeğinde kullanım alanı bulamamakta iken Blake tipi çeneli kırıcılar geniş ölçüde kullanılmaktadırlar. Blake tipi çeneli kırıcılar çenenin hareket sistemine göre tek ya da çift salgı kollu (istinat kolu) çeneli kırıcılar olarak sınıflandırılırlar. Tek salgı kollu çeneli kırıcılarda hareketli çene üstten doğrudan eksantrik sisteme bağlıdır. Bu nedenle çene hareketi eliptiktir, bu da malzemenin kırıcı içerisinde daha hızlı itilmesini ve daha yüksek kapasite sağlar. Bunun bir dezavantajı kırıcının kolay aşınmasıdır. Çift salgı kollu (istinat kollu) çeneli kırıcılarda ise eliptik hareket yoktur. Hareketli çene doğrudan eksantrik sisteme bağlı değildir. Salgı kollarından biri emniyet kolu olarak kullanılır. Bu yüzden çift salgı kollu çeneli kırıcılar sert ve aşındırıcı cevherlerde daha çok kullanım alanı bulmaktadırlar (Yıldız 2007). Şekil 3.3' de çift salgı kollu üstten mafsallı Blake türü bir çeneli kırıcının kesit görünümü verilmektedir.



Şekil 3.3 Çift salgı kollu Blake tipi çeneli kırıcı kesiti ve besleme ağzına göre isimlendirme ölçüleri.

3.3 DARBELİ KIRICILAR

Hem birincil, hem de ikincil kademe kırma işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu gruba giren kırıcılar, darbe ile şok oluşturarak kırma yaparlar. Kırıcıya serbest düşme ile giren cevher parçaları, dönme hızları çok yüksek olan kırma elemanlarının darbelerine maruz kalırlar. Bunun sonucu oluşan şok, cevher parçasını parçalar. Kırma elemanları, kinetik enerjilerinin bir kısmını cevher parçalarına aktarırlar ve bu aktarılan enerji, taneler içerisindeki iç gerilmeleri belirli bir düzeyin üzerine çıkardığında taneler kırılır. Taneler üzerindeki şok etkisini arttırmak için sabit plakalara çarptırılırlar. Bu mekanizmayı kullanan iki tip kırıcı vardır.

Bunlardan ilki kırıcı elemanlar olarak çekiçlerin kullanıldığı çekiçli kırıcılardır. Kırıcıların çıkış kısmında yuvarlak delikli bir ızgara veya elek bulunur. Böylece malzeme yeterince ufalanmadan kırıcıyı terk edemez ve sürekli darbe etkisinde kalır. Rotorun hızı 500 ile 3000 d/d arasında değişebilir. Aşınma oranları çok yüksektir ve özellikle kömür ve kireç taşı gibi aşındırıcı olmayan malzemelerin kırılmasında kullanılır. Çekiçli kırıcıların BKO değerleri 15:1'e ulaşabilir.

Bir diğer darbeli kırıcı tipi ise şoklu kırıcılardır. Bu tip kırıcılarda kırıcı elemanlar rotora sabit olarak bağlanmışlardır ve kırıcı çıkışında herhangi bir elek ya da ızgara yoktur. Rotor üzerine beslenen iri cevher parçaları, 250 ile 500 d/dk hızla dönen kırma elemanları tarafından çarptırma levhalarına çarptırılırlar. Şoklu kırıcılar 1500 mm iriliğindeki cevher parçalarını 1500 ton/h kapasite ile 200 mm boyutunun altına ufalayabilirler. Kapasiteleri 3000 ton/saat'e

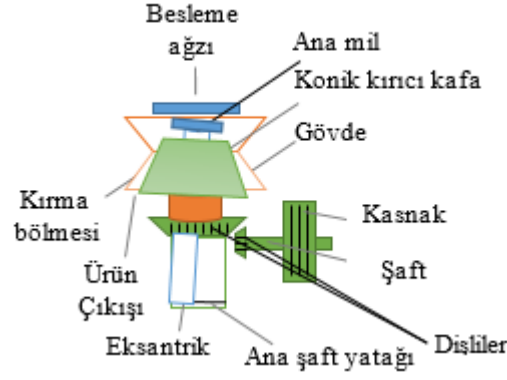
varmaktadır. Aşınma diğer birincil kademe kırıcı cihazlara göre fazladır. Bu yüzden % 15'den fazla silis içeren cevherlerde kullanılmamaları önerilmektedir. BKO değerleri 40:1'e kadar çıkabilen şoklu kırıcılar birincil kırıcı olarak kullanılabilir (Yıldız 2007). Şekil 3.4'de darbeli kırıcı görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.4 Darbeli kırıcı (FABO 2020).

3.4 KONİK KIRICILAR

Döner kırıcıların, ikincil, üçüncül hatta dördüncül kırma yapmak için değiştirilmiş bir türüdür. Döner kırıcılarda olduğu gibi ana mil, kırıcı kafa (göbek), kesik koni şeklinde gövde ana parçalardan oluşurlar. Daha kısa olan ana mil, üstten asılma yerine kırıcı kafa altında bulunan alt gövde ile irtibatlı küresel yatak tarafından taşınır. Döner kırıcılara göre daha ince kırma yapan konik kırıcılarda geniş bir ağız açıklığı gerekli olmadığından üst gövde yukarıdan aşağı daralan bir biçimde değil, genişleyen bir kesik koni şeklindedir. Bu da kırılan malzeme için kırıcı çıkışına doğru daha geniş bir boşalma kesit alanı oluşturarak yüksek kapasiteye müsaade eder. Konik kırıcılar, kırıcı kafa alt çapı ile tanımlanır. 55-60 cm' den 3.1 m çapa kadar imal edilebilirler. Bu çaptaki kırıcı 19 mm çıkış açıklığı ile 1100 ton/saat kapasiteye ulaşmaktadır (Wills 1997). Bu kırıcılarda 400 ile 700 d/dk arasında yüksek dönme hızları kullanılır. Titreşim genliği 5 cm kadar olabilir. Yüksek titreşim genliği ve hıza sahip olduğu için konik kırıcılar malzemeyi basınçtan ziyade darbe ile kırarlar. Boyut küçültme oranları genelde 3 ile 7 arasında değişmektedir (İpekoğlu ve Tanrıverdi 2002). Şekil 3.5' de bir konili kırıcının kesit görünümü verilmiştir.



Şekil 3.5 Konili kırıcı kesit görünümü.

Symons konik kırıcısı endüstride en çok kullanılan konik kırıcı tipidir. Farklı boyutlarda kırma yapmak için imal edilen iki tip Symons konik kırıcısı vardır. Bunlardan ilki standart konik kırıcı diğeri ise kısa kafalı konik kırıcıdır. Standart konik kırıcılar ikincil kırma yapan kırıcı cihazlardır. En büyük boyutu 0.5 ile 6 cm arasında değişen ürünler verirler. Kırma zonu basamak şeklinde astarlardan yapıldığı için iri besleme ile çalışabilirler. Kısa kafalı konik kırıcıların ürünleri ise en büyük boyutu 0.3 ile 2 cm arasında olan ürünler verirler. Bu cihazlar daha çok üçüncül kırma kademesinde kullanılırlar. Kırıcı kafa standart türe göre daha dik olarak imal edilmiş ve ince malzemenin tıkanmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır.

3.5 MERDANELİ KIRICILAR

Yatay ve paralel eksenler etrafında zıt yönlerde dönen iki silindirden ibarettir. Kırılacak parça bu iki tambur arasına girerek baskı zorlaması ile kırılır. Kırıcının ana unsurları gövde, gergi çubukları ve gergi yayları, merdaneler, volanlardır. Merdaneli kırıcılar diğer kırıcılara nazaran daha az ince ürünler verirler ve BKO değerleri (2-4) düşüktür. Daha iri ürün vermelerinin nedeni malzemenin kırıcıdan geçiş süresinin az olmasıdır. Besleme boyutuna bağlı olarak istenen BKO değerlerinin elde edilmesi için çok büyük merdanelere ihtiyaç duyulduğundan en pahalı kırıcı cihazıdır. Genel olarak son kırma kademesinde kullanılmaktadırlar. Ayrıca çok kırılğan, yapışkan, donmuş kalker, kömür, jips, fosfat ve yumuşak demir cevheri gibi malzemeler için uygundurlar.



BÖLÜM 4

ÖĞÜTME İŞLEMİ VE DEĞİRMENLER

Boyut küçültmenin ikinci ve son kademesidir. Öğütme işlemi de kendi içinde farklı kademelerde yapılabilir. Genel olarak kırma kademesinden gelen birkaç cm boyutlu kırılmış cevheri 10 μm ile bir kaç yüz μm arasında değişen boyutlara ufalamak için yapılan bir boyut küçültme işlemidir. Öğütme işlemi ile malzemelerin özgül yüzey alanlarının ve tane inceliklerinin artmasının sonucu olarak, öğütmeden sonraki endüstriyel işlemler veya nihai kullanım alanları için gerekli tane inceliklerini sağlamak hedeflenmektedir.

Öğütme işlemi, öğütülecek malzemenin üretildiğindeki nem oranına ve buna bağlı olan kullanım şartına göre yaş ya da kuru olarak uygulanabilir. Bununla birlikte, öğütme işlemi de kırma işleminde olduğu gibi açık veya kapalı devre olmak üzere iki şekilde uygulanabilmektedir.

Öğütme işleminde en yaygın şekilde kullanılan değirmen türleri, aktarılan ortam türü değirmenler, valsli değirmenler ve yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerdir.

Öğütme işlemi genel olarak enerjinin en fazla kullanıldığı endüstriyel faaliyetlerden biridir. Dolayısıyla öğütme işleminden önce üründen istenilen tane boyutunun bilinmesi, malzemenin öğütülebilme zorluğunun (öğütülebilirliğinin) ve istenilen tane boyutuna ulaşmak için gerekli enerjinin öngörülebilmesi önemlidir.

4.1 ÖĞÜTMEDE TÜKETİLEN ENERJİ VE ÖĞÜTÜLEBİLİRLİK KAVRAMI

Malzemenin öğütülebilirliği, o malzemenin öğütmeye karşı gösterdiği direncin ifadesidir. Başka bir deyişle, malzeme üzerinde öğütmede harcanacak enerji ile bu öğütmeden istenen malzemenin tane boyutu inceliğinin sağlanabilmesinin kolay ya da zor olmasının bir ölçüsüdür. Bu ifade, öğütme işleminde kullanılacak değirmenin tasarlanması, harcanan enerjinin

öngörülmesi ve öğütme verimliliğinin hesaplanmasında temel bir öneme sahiptir. Öğütme işlemindeki doğrudan öğütücü cihazın işletmesi ve tasarımı ile ilgili diğer tüm değişkenler malzemenin öğütülebilirlik özellikleri üzerine tasarlanır.

Farklı malzemelerin öğütülebilirlikleri bir yana, aynı tür cevherlerin öğütülebilirliğinde bile, çalışma şartlarında farklılıklar gözükmemektedir. Bu durum, öğütme işlemi için önemli bir problem olmaktadır. Bu nedenle, öğütülecek cevherin öğütülebilirliğinin sürekli olarak kontrol edilmesi gerekir. Öğütmeye karşı olan bu direnç ne kadar fazla ise öğütme işleminde o derece fazla enerji tüketilecek ve enerji verimliliği aynı nispette düşük olacaktır. Endüstriyel ölçekli öğütme işlemi öncesinde, laboratuvar ve pilot ölçekli testler ile işlemin mümkün olan en büyük temsiliyetle önceden test edilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla, tüm laboratuvar koşullarında uygulanabilen basit, hızlı ve doğru sonuçlar verebilen test yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile çalışmakta olan tesislerin deneysel ve gerçek değerleri birlikte değerlendirilir (Yıldız 2007). Bir malzemenin öğütülmesinde tüketilen enerji ve öğütülebilirliğinin belirlenmesi için gerekli testlerin başında Bond ve Hardgroove öğütülebilirlik testleri temel niteliktedirler.

4.1.1 Bond Deneyi

Bond 1960'lı yıllarda ortaya attığı iş indeksi kavramı, tıpkı bir metre ölçüm cihazının mesafeleri ölçmesine benzer şekilde boyut küçültme işlemlerinde gerekli enerjinin kullanımını ve işletme değişkenlerinin değişimine göre farklı öğütme işlemlerinin karşılaştırılmalarını sağlamaktadır. Bond, malzemelerin iş indekslerini belirlemek için kendisine ait test yöntemini geliştirmiştir. İş indeksi, Teorik olarak sonsuz boyuttaki cevher kütlesinin % 80'inin geçtiği sınırsız teorik elek boyutunu 100 mikrona getirmek için yapılan öğütme işlemindeki ton başına harcanan enerji olarak tanımlanabilir. İş indeksi, değirmenlerin boyutlandırılmasında, enerji tüketim hesaplamalarında, öğütme devrelerinin verimliliğinin belirlenmesinde kullanılan, cevherin öğütülebilirliğine bağlı ve cevher hazırlamadaki en önemli araştırma konularından biridir. Eşitlik 4.1'de belirtilen denklemde deneye bağlı iş indeksi ($W_{i \text{ deney}}$) öğütülen malzeme için bulunur.

$$W_{ideney} = \frac{1,10 * 44,5}{P_i^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left[\frac{10}{\sqrt{X_{p80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{f80}}} \right]} \quad (4.1)$$

Bond testinin genel olarak yapılışına, standart değirmenin özelliklerine ve bu tez kapsamında yapılan Bond testi çalışmalarına deneysel çalışmalar bölümünde değinilecektir.

Bond kapalı devre bir öğütme işleminde besleme ve ürün boyutunun öğütme enerjisi üzerindeki etkisinin Eşitlik 4.2’de ifade edilen denklem ile bulunabileceğini iddia etmiştir.

$$E = W_{ideney} \left[\frac{10}{\sqrt{X_{p80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{f80}}} \right] \quad (4.2)$$

Bond iş indeksi tanımının bir sağlaması olarak bu işlem yapıldığında X_{f80} değeri teorik olarak çok büyük bir boyut olur. X_{p80} değeri ise 100 μm olacağından. Öğütme için gerekli enerji, iş indeksine eşit olacaktır. Bu durum eşitlik 4.3’de belirtilmiştir (Austin 1973) .

$$E = W_i \left[\frac{10}{\sqrt{100\mu m}} - \frac{10}{\sqrt{\text{teorik sonsuz boyut}}} \right] = W_i \quad (4.3)$$

Bu yöntemde kullanılan eşitlikler bugünde geçerliliğini korumakta ve diğer yöntemler için kaynak niteliğinde olmaktadır. Bond yöntemini kaynak olarak kullanan ve daha hızlı veya daha hassas olabilme amacıyla olan iş indeksi hesaplama yöntemlerinden bazıları arasında, Berry ve Bruce yöntemi, Smith ve Lee yöntemi, Horst ve Bassarear yöntemi, Kapur yöntemi, Karra yöntemi, Yashima yöntemi, Anaconda yöntemi sayılabilir (Yıldız 2007).

Bond testinde kullanılan değirmenin işletme ve tasarım değişkenleri standarttır. Değirmenin boyu çapına eşit ve 30.5x30.5 cm (1x1) feet’dir. Değirmen 70 d/dk sabit dönüş hızı ile çalıştırılır. Değirmen içerisindeki öğütücü ortam, boyutları ve sayıları belli çelik bilyelerden oluştuğu için bilye ağırlığı (21125 gr) ve dolayısıyla bilye şarj oranı (%19.3), bilye hacmi (4,3 dm³) bilyeler arası boşluk (1,72 dm³) sabittir. Bond testinde kullanılan bilyelerin çaplarına (boyutlarına) göre

adetlerinin dağılımı 43 adet (36,8 mm), 67 adet (29,7 mm), 10 adet (25,4 mm), 71 adet (19,1 mm), 94 adet (15,5 mm) olmak üzere toplam 285 adet bilya kullanılmaktadır.

4.1.2 Hardgroove Deneyi

Hardgroove yöntemi bir cevherin kolay ya da zor öğütülebilirliğinin bir ölçüsü olarak 1930'lu yıllardan beri kullanılmaktadır. Bu yöntem kendine has bir H indeksi değerini kullanmaktadır. H indeksi değerinin düşük ya da yüksek olması, öğütülebilirliğin sırasıyla zor ya da kolay olmasının bir ölçüsü olarak kabul edilir. Bu yöntemde öğütme için gerekli enerjinin tespit edilemeyişi yöntemin bir kusuru olarak kabul edilmektedir. Hardgroove yönteminin en önemli avantajı basit ve hızlı bir yöntem olmasıdır. Hardgroove deneyi bu tez konusu kasamı dışında olduğu için deneyin yapılışına ayrıntı ile değinilmemiş, ancak H indeksinin kullanımı ve hesaplanması için gerekli bazı teknik bilgiler aşağıdaki paragrafta paylaşılmıştır.

Bu yöntemde 2,54 cm çapındaki 8 adet mangan veya krom çeliğinden imal edilmiş bilya, bu bilyaların içine yerleştirildiği dairesel bir yatak ve bilyalar üzerinde, 28 kg-f'lık bir dairesel baskı oluşturacak şekilde konumlanmış, kırıcı yarım konik kafadan oluşan özel bir değirmen kullanılmaktadır. Öğütülecek malzeme örneği 50 gr'dır ve belirli bir boyut aralığında (-1,18 + 0,59 mm.) sınıflandırılmıştır. Kırıcı kafa dönüş hızı 1/3 devir/sn ve toplam dönüş sayısı 60 devirdir. Öğütme sonunda, örnek 74 µm'luk bir elekten elenir ve elek altına geçen malzemenin gr cinsinden kütlesi (M_{74}) yönteme ait olan Hardgroove eşitliğinde yerine konularak H indeksi hesaplanır. Hardgroove eşitliği Eşitlik 4.4'de ifade edilmiştir. Hardgroove testi farklı malzemelerin öğütülebilirliklerini karşılaştırmak için pratik bir kullanıma sahiptir

$$H = 13 + 6,93M_{74} \quad (4.4)$$

4.2 DEĞİRMENLER

Endüstride kullanılan öğütücü cihazlara değirmenler denir. Değirmenler genel olarak darbeli değirmenler, aktarılan ortamlı değirmenler, merdaneli değirmenler, hava jetli değirmenler ve diğer değirmen türleri olarak sınıflandırılmaktadır (Yokoama and Inouke 2007). Bu çalışmada, tez konusuna yakınlığı açısından aktarılan ortam türü ve merdaneli değirmenlere değinilecektir.

4.2.1 Aktarılan Ortam Türü Değirmenler

Bu tip değirmenlerde öğütme için gerekli enerji, bilya, boncuk, çubuk, çakıl, cevherin kendi iri parçaları gibi değirmen gövdesi içinde bulunan öğütücü ortamın hareket ettirilmesiyle malzemeye aktarılır (Neikov 2019). Bu değirmenler, öğütücü ortamlarının öğütme için gerekli enerjiyi malzemeye aktarma şekillerine göre iki temel grupta incelenebilirler. Bunlardan ilki değirmen gövdesinin hareketi (dönme, titreşim, santirfuj etki) ile öğütme yapan değirmenlerdir. Diğeri ise değirmen içindeki aşındırıcı mekanizmanın hareketi ile öğütme yapan değirmenlerdir (Yokoama and Inouke 2007). Birinci grupta, aktarılan ortamlı döner tambur tipi değirmenler (bilyalı, çubuklu ve otojen değirmenler) , titreşimli değirmenler ve yörüngesel değirmenler sayılabilir. İkinci grupta ise karıştırmalı değirmenleri saymak mümkündür. Bu iki temel enerji iletim hareketine göre içlerindeki öğütücü ortam malzemeyi sürtünme, darbe, çarpma kesme ve aşındırma etkisiyle öğütür.

Öğütme, öğütücü ortam boyutu, miktarı, hareket türü ve aralarındaki boşluk gibi faktörlere bağlıdır. Genellikle yaş (su ile cevher karışımı halinde besleme) yöntemle veya kuru yöntemle de uygulanabilir.

4.2.1.1 Tambur Tipi Değirmenler

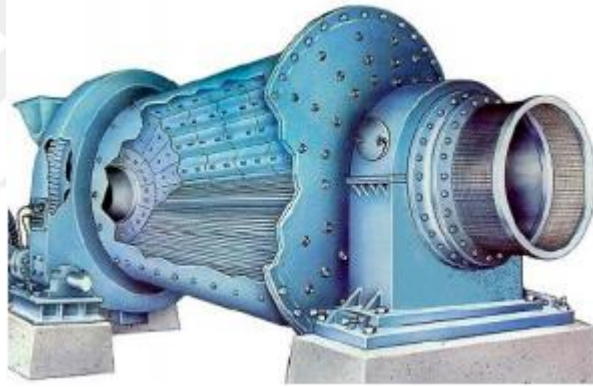
Bu tür değirmenler, yatay bir eksen etrafında dönen tambur şeklinde bir gövde, gövde içinde aşınma astarları ve ismini aldığı öğütücü ortamdan oluşmaktadırlar. Öğütücü ortam olarak çubuk, bilye, çakıl ve öğütülecek cevherin iri parçaları kullanılmaktadır. Öğütücü ortam türüne göre bilyalı değirmen, çubuk ise çubuklu değirmen, çakıl ise çakıllı değirmen (tüp değirmen veya boru değirmen), ortam cevherin iri kısmı ise otojen değirmen olarak sınıflandırılırlar.

Gövde şekline göre ise silindir, silindirokonik veya konik gövdeli değirmen olarak, değirmen boşaltma (taşma) şekillerine göre ise düz taşma, ızgaralı taşma, spiralli taşma, çıkış odalı taşma gibi sınıflandırılabilirler.

Çubuklu Değirmenler

Çubuklu değirmenler, ince kırıcı ya da kaba öğütücü cihazlar olarak kullanılabilir. Genellikle öğütmenin ilk aşamasında kullanılırlar. Çubuklu değirmenlerde silindirik gövde uzunluk/çap

oranı 1,5 ile 2,5 arasında değişmektedir. 50 mm boyutlu bir taneyi 300 µm boyutunun altına ufalayabilir. Genellikle BKO değeri 15:1 ile 20:1 arasında değişmektedir. Değirmen çubuklarının eğilme göstermemesi için 6 m' den uzun olmaması gereklidir. Çubuklu değirmenler boşalma şekline göre sınıflandırılırlar. Ocaktan gelen öğütülecek cevherin nem oranına göre yaş veya kuru öğütme işlemi yapılmaktadır. Yaş öğütmede malzeme değirmene pülp (bulamaç) halinde ve belli bir % PKO'da beslenir. Değirmene beslenen PKO % 60 ile 70 arasında değişirken, bu oran eğer değirmene daha ince besleme yapılacaksa düşürülür. Çubuklu değirmenler kritik hızın % 50'si ile 65'i oranında çalıştırılırlar. Çubuklu değirmenler eğer bilyalı değirmen ile birlikte çalışacaksa daima önce kullanılırlar. Elde edilen ürün birbirine yakın boyutludur. Bunun nedeni çubuklu değirmenlerde değirmen gövdesi boyunca uzanan çubuklar arasındaki boşlukların aynı kalması ve bu boşlukların öğütülen malzemenin üst boyutunu sınırlandırmasıdır. Çubuklu değirmende şarj oranı % 35'dir. Şelil 4.1' de çubuklu değirmen kesiti verilmiştir.

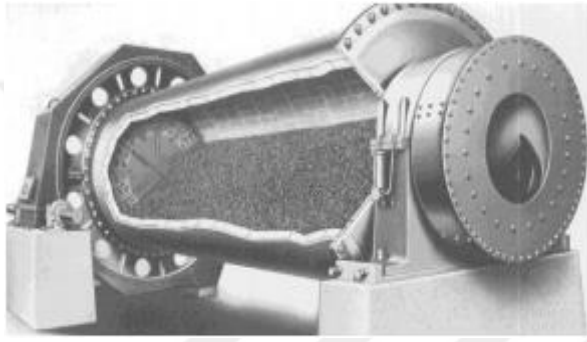


Şekil 4.1 Çubuklu değirmen kesit görünümü (Yıldız 2007).

Bilyeli Değirmenler

Boyut küçültmenin genellikle son aşamasında kullanılır. Birim ağırlık başına bilya yüzey alanı çubuklardan daha fazla olduğu için çubuklu değirmene göre daha ince ürün verirler. Bilyalı değirmenlerde Uzunluk/çap oranı 1 ile 1,5 arasında sınırlıdır. Bilyalı değirmenlerde beslenen malzeme boyutu 9,5 ile 1,2 mm arasında değişirken, öğütülen cevherin boyutu 600 µm ile 45 µm arasında değişmektedir (Yıldız 2007). Genellikle BKO 20:1 50:1'dir. Bilyalı değirmenler de çubuklu değirmenler gibi boşaltma şekillerine göre sınıflandırılırlar. Değirmene beslenen malzemenin % PKO değeri % 65 ile 80 arasında değişmektedir. Öğütme verimi bilyaların yüzey

alanı ile ilgilidir. Öğütülecek malzemenin en büyük boyutunu en uygun şekilde öğütebilecek bilya boyutu kullanılmalıdır. Şarj miktarı değirmen iç hacminin % 40-50'si kadardır ve çubuklu değirmenden fazladır. Optimum değirmen hızı da değirmen şarj oranı ile artar. Bu hız kritik hızın % 70'i ile 80'i arasında değişmektedir. Bilyalı değirmenler genellikle tek bölmeli olarak kullanılırlar. Bazı endüstri dallarında birden fazla bölme olabilir. Çimento endüstrisinde genellikle iki bölmeli bilyalı değirmenler kullanılmaktadır. Çimento değirmenlerine, bu tez kapsamında çimento ana başlığında değinilecektir. Şekil 4.2' de tek ve çift bölmeli bilyalı değirmenlerin kesit görünümü verilmektedir.



(a) Tek bölmeli



(b) Çift bölmeli

Şekil 4.2 Bilyalı değirmenlerin kesit görünümü (Yıldız 2007).

Otojen Değirmenler

Otojen öğütme ocaktan çıkan veya birincil kırma işleminden geçen cevherin bir değirmen içinde kendi kendine öğütülmesidir. Bu işlemi yapan değirmenlere otojen değirmen adı verilir. Yeterli miktarda iri boyutta ve sağlamlıkta taneler içeren cevherlerde bu tip öğütme öğütücü ortam masrafını ortadan kaldırmakta ve daha düşük oranlarda şlam oluşturduğu için oldukça avantajlı hale gelmiştir. Otojen öğütme yaş veya kuru olarak uygulanabilir. Otojen öğütme genellikle birincil kademe öğütme gayesiyle kullanılır. Otojen değirmenler kritik hızın % 80 – 85'i arasında bir hızla çalıştırılırlar. Genellikle uzunluk/çap oranı düşüktür. Otojen değirmenlerde en büyük boyutu 25 cm olan cevherin boyutu 100 µm boyutunun altına ufalanabilir.

Besleme malzemesinde, iri boyut miktarının az olduğu durumlarda çakıllı öğütme uygulanmaktadır. Çakıllı öğütmede malzemenin iri kısmı (çakıl) eleklerle ayrılır. Geri kalan ince

kesimin boyutu kırma devresi ile öğütmeye uygun hale getirilir. Daha sonra, ayrılan iri kısım öğütücü ortam olacak şekilde kırma devresinden gelen cevher ince öğütülür.

4.2.1.2 Titreşimli Değirmenler

Öğütme işlemi diğer aktarılan ortamla çalışan döner değirmenlerdeki gibi silindirik bir gövde içindedir. Bu değirmenlerin farkı ise malzemeye öğütme etkisinin, bu gövdenin titreşimi ile malzemeye iletilmesidir. Titreşimli değirmenler lastik takozlar ya da yaylar üzerine oturtulmuş 1500 d/d hız ile dönerek titreşim oluşturan, dengesiz ağırlıklı, 1 ya da 4 öğütme odalı kapalı bir sistemden oluşmuştur. % 60 -70 şarj oranında 10 -15 mm çaplı öğütücü bilya ve öğütülecek malzeme bu kapalı odalarda titreşimle öğütülür. Değirmen kapasitesi 5 ton/h'dir. En büyük boyutu 30 mm olan malzeme 10 µm boyutunun altına öğütülebilir. Enerji verimliliği yüksek, yatırım maliyeti düşüktür. Ancak değirmenlerin bakım maliyetleri yüksektir (Smith 1974, Yıldız'dan 2007). Titreşimli değirmenler öğütülecek malzeme boyutundaki değişikliklere karşı çok hassastır (Wills 1985, Yıldız'dan 2007).

4.2.1.3 Yörüngesel Değirmenler

Değirmen gövdesinin santrifüj esasına göre hareket ettirilmesiyle çalışan değirmen türleri yörüngesel tip (gezegen) değirmenlerdir. Öğütme gövdesi içindeki öğütücü ortam bilyalardan oluşur. Bu öğütücü ortam santrifüj etki ile kazandığı enerjiyi malzemeye aktarır. Yörüngesel değirmenler dönen bir tabla ve tabla üzerinde simetrik olarak yerleştirilmiş tablanın dönüş yönünün ters yönde dönen öğütme gövdelerinden oluşur. Öğütücü ortam ve gövde zirkon, krom çeliği, krom nikel çeliği, tungsten carbid, silikon nitrit, agat oluşumlarından imal edilebilir. Öğütme gövdeleri içindeki öğütücü ortamın malzeme üzerinde ulaştırıldığı santrifüj etki 150 G kuvvetine kadar çıkabilir. Bu tip değirmenler sıklıkla araştırma amaçlı olarak kullanılırlar (Neikov 2019).

4.2.1.4 Karıştırma Değirmen

Bu değirmenlerde öğütücü ortam olarak bilye, boncuk veya aşındırıcı cevherler kullanılabilir. Öğütücü ortamın değirmen gövdesi içindeki bir karıştırma mekanizması ile kazandığı hareket enerjisi malzemeye aktararak öğütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Karıştırma mekanizması yatay veya dikey yönde dönen bir şaft ve bu şafta monte edilmiş disk, pin, halka, helisel vida

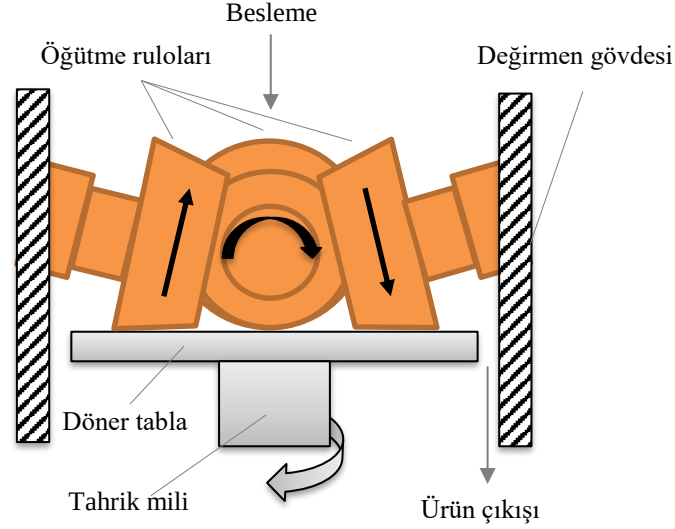
şeklindeki karıştırıcı aksam ve dış gövdeden oluşur. Karıştırma mekanizmasının doğrudan dış gövdeye bağlı olduğu ve gövdenin hareket ettirilmesiyle öğütmenin gerçekleştirildiği tür değirmenler de mevcuttur. Yaş veya kuru öğütmeye uygundurlar. Karıştırmalı değirmen bu tez çalışmasında temel bir değirmen olduğu için yine bu bölümde ayrı bir başlık altında ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.

4.2.2 Merdaneli Değirmen

Merdaneli değirmenler genel olarak iki sınıfta incelenirler. Bunlardan ilki bir tabla yüzeyi üzerinde birbirini dönerek takip eden merdaneler (valsler) ve bunu çevreleyen bir gövdeden oluşan valsli değirmenler, diğeri ise beslemenin birbirine zıt yönde dönen iki merdane arasında yüksek basınçla yapıldığı yüksek basınçlı merdaneli değirmenlerdir (Yokoyama and Inoue 2007).

4.2.2.1 Valsli Değirmen

Bu tür cihazlarda malzeme baskı ve sürtünme etkisi ile ufalanır. Döner bir tabla üzerine yerleştirilmiş 2-4 adet silindirik tekerlek bu tablaya basınç yapar. Masanın ortasına beslenen malzeme masanın dönüşü ile tabla ortasındaki tümseğinde yardımıyla bu silindirik tekerleklerin altına doğru sürüklenir. Tekerleklerin altında ezilen taneler sisteme alttan verilen hava ile değirmenin üst tarafına iç ters konik gövde ile dış gövde arasındaki bölgeden hareket ederler buradaki kanatlı separatörden geçebilen taneler ters koni içerisine girerler. Burada ince taneler ürün olduğundan değirmeni terk ederken iri taneler ters koni içerisinden aşağıya doğru hareket ederek besleme malzemesi ile birlikte öğütme tablasına tekrar girerler. Son yıllarda 600 ton/saat kapasiteli valsli değirmenler imal edilmektedir (Yıldız 2007). Şekil 4.3’de valsli değirmenin kesit görüntüsü ve resmi verilmiştir.



Şekil 4.3 Valsli değirmenin kesit görünümü.

4.2.2.2 Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen

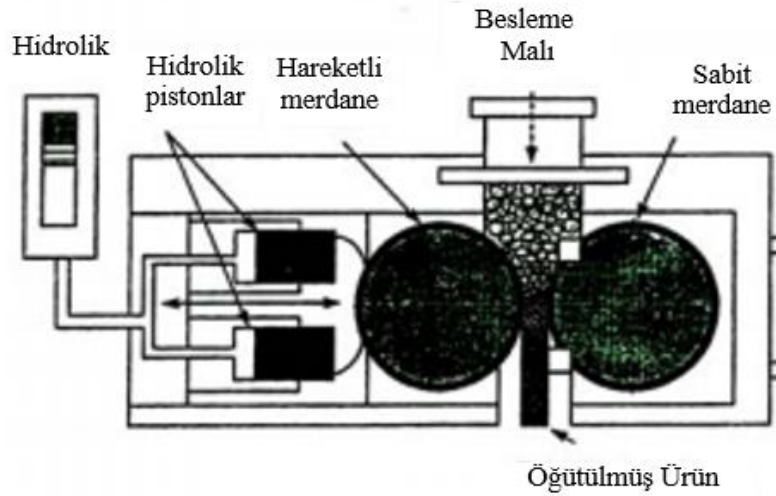
Son yıllarda yüksek basınçta sıkıştırma ile ufalama işleminin yapılmasında yüksek basınçlı merdaneli değirmenler (YBMD), en yaygın kullanımıyla, çimento endüstrisinde değirmen öncesinde ön öğütme ya da nihai öğütme ürününün elde edilmesinde kullanım alanları bulabilmektedirler (Jankovic et al. 2015). YBMD'ler, mineral endüstrisinde de özellikle üçüncül kırıcıların, çubuklu değirmenlerin ve yarı otojen değirmenlerin yerini alma potansiyeline sahiptir (Aydoğan ve Ergün 2004).

Yüksek basınçlı merdaneler şekil olarak merdaneli kırıcılara benzerler, ancak çalışma şekilleri oldukça farklıdır. Merdaneler arası boşlukta tek tek tane kırılması yerine yüksek basınçla sıkıştırma ilkesi kullanılmaktadır (Yıldız 2007). Merdaneler arası boşluk 60 mm'ye kadar çıkabilir. Sıkıştırılmış malzemenin yığın yoğunluğu gerçek yoğunluğunun % 70-85'inin üzerine çıkarılabilir (Klymowsky et al. 2002, Dünder'dan 2012) ve malzeme içerisinde büyük oranda mikro çatlak oluşumu meydana getirilebilmektedir. Bu da ilerleyen öğütme kademeleri için önemli bir avantaj sağlar. Öğütülmüş malzeme, ekipmanı sıkıştırılmış bir kek formunda terk etmektedir.

Ters yönde dönen iki merdanelinin birisi sabit bir yatağa monte edilmişken diğer merdane hidrolik silindirler aracılığıyla sabit merdaneye doğru tutulmaktadır (Jankovic et al. 2015). İki merdane ayrı motorlar ile tahrik edilir. Malzeme bu iki merdane arasındaki boşluğa silolardan

çoklu besleme şeklinde beslenir. Merdaneler arasındaki boşluğa gelmeden önce merdaneler arasındaki boşluktan iri olan taneler tek tane kırılmasına maruz kalırlar ve giderek hızlanarak merdaneler arasındaki boşluğa hareket ederler. Daha küçük boyutlu taneler ise merdaneler arasında sıkıştırılmış bir ince tane yatağı oluşturarak verimli bir kırma mekanizması sağlamaktadır (Hilden and Suthers 2010).

Yapıları nedeniyle az yer kaplamaları, enerji tasarrufu ve az astar aşınması nedeniyle aynı boyutlarda öğütme yapan değirmenlere göre avantajlara sahiptirler. Sabit merdane üzerine 300-400 MPa basınç uygulanır (Yıldız 2007). Endüstriyel uygulamalarda motor güçleri 100-4000 kW, merdane çapı 750-2500 mm, merdane boyu 260-1800 mm, merdane çizgisel hızı 0,5-2 m/s arasında değişmektedir (Aydoğan ve Ergün 2004). Merdaneli değirmenler yüksek verimli havalı sınıflandırıcılarla kapalı devre çalıştırıldıklarında 10 mikronun aşağısında da öğütme gerçekleştirebilirler (Schönert 1990, Dünder'dan 2012) Şekil 4.4'de yüksek basınçlı merdaneli değirmenin kesit görünümü verilmiştir.



Şekil 4.4 Yüksek basınçlı merdaneli değirmenin kesit görünümü (Yıldız 1999, Demir vd' den 2007).

4.3 KARIŞTIRMALI DEĞİRMENLER

Karıştırmalı değirmenler (KD), çok ince malzeme üretiminde kullanılan, öğütmede birim hacimde yüksek enerji yoğunluğu oluşturmaları ve dolayısıyla yüksek öğütme verimliliği sağlamaları nedeniyle son yıllarda giderek öne çıkan ve önem kazanan öğütücü cihazlardır. Karıştırmalı değirmenlerde, çok yüksek bir kinetik enerji, öğütücü ortam ve öğütülecek

malzemeye karıştırıcıların dönüş eksenı yönünde (radyal yönde) aktarılmaktadır. KD'ler diğerk aktarmalı ortam ile çalışan değirmenlere göre bu kinetik enerji aktarımını çok daha küçük bir hacimde yoğun bir şekilde yapabildikleri için birim zaman ve hacimde açığa çıkan enerji miktarları çok yüksektir. Bu durum, KD'lerin özgül enerji tüketimlerinin çok düşük olmasını açıklamaktadır.

KD'lerde malzemeler, çok daha fazla sayıda, ince ve genellikle eşit boyuttaki öğütücü ortam ile çok ince öğütülebilmektedirler. Bu nedenle, öğütme ürününün dar tane boyut grubunda olmasının önemli olduğu endüstri sahalarında tercih edilmektedirler (Miranda ve Yaeger 1998, Wang ve Forsberg, 2000, Pilevneli'den 2003). Bununla birlikte, çok ince serbestleşmenin gerekli olduğu cevher zenginleştirme işlemlerinde yüksek enerji verimliliğı nedeniyle tercih edilmektedirler.

KD'teknolojisi madencilik endüstrisine yeni sayılabilecek bir teknolojidir. Bu değirmenlerin ilk uygulamaları 1928 yılında Klein ve Szegvari ismindeki girişimciler tarafından küresel şekilli bir öğütücü ortam ve karıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Bu karıştırıcılar düşük hızlarda çalıştırılmışlardır. Du Pont firması, 1948 yılında önceden boya ve mürekkep üretiminde kullanılan değirmenin, kum öğütme işleminde yüksek karıştırıcılı biçimine uyarlamış ve KD teknolojisinde bir dönüm noktası yaşanmıştır (Stehr 1988). Cevher hazırlama endüstrisinde serbestleşme için ince taneye olan gereksinimin artmasının da etkisiyle 1953 yılında KD'ler bu alana girmeye başlamıştır (Jankovic 2003).

Cevherin tenörü ne kadar fazla ise serbestleşme için gerekli tane boyutu o derece büyük olur. Serbestleşme tane boyutunun büyük olması öğütme ürününden istenilen d_{80} boyutunun daha yüksek olmasını sağlar. Kıymetli minerallerin zamanla tükenmeleri giderek daha düşük tenörlü ve daha düşük serbestleşme boyutlarında cevherlerin üretilmesini zorunlu hale getirmektedir (Sinnot vd. 2006). Buda özellikle çok ince boyutta serbestleşmenin ve buna bağılı olarak ürün inceliğinin gerekli olduğu endüstri faaliyetleri için KD'lerin kullanılmasının önünü açmaktadır.

Son yıllarda, ince taneli öğütme ürününe olan talebin artması ile KD'lerin geleneksel öğütme işlemlerine karşı olan avantajı giderek artmaktadır. Bu nedenle KD'ler literatürde sık sık geleneksel aktarmalı ortam değirmenleri ile karşılaştırılırlar. Bu geleneksel cihazların başında öğütme işlemlerinin son kademesinde kullanılan bilyeli değirmenler gelmektedir.

KD'lerin geleneksel aktarmalı değirmenlere göre önemli temel bazı üstünlükleri olarak; basit kurulum işlemi, yüksek boyut küçültme oranı, öğütücü ortamın az aşınması ve dolayısıyla öğütülecek malzemeyi daha az kirletmesi, düşük enerji tüketimi ana başlıkları sayılabilir (Miranda ve Yaeger 1998, Wang ve Forsberg 2000, Sinnot vd 2006, Samanlı'dan 2008).

KD'lerde öğütmeyi sağlayan kuvvet etkisi, yüksek hıza bağlı darbe etkisinin yanında aşındırma ve kesme etkisi ile öne çıkar. Geleneksel değirmenlerde ise kinetik enerji düşük olduğu için ufalama etkisi daha çok öğütücü ortamın kütlesi (dolayısıyla hacmi ve tane boyutu) ile oluşturulur. Bu da geleneksel aktarmalı ortam değirmenlerinde darbe, ezme ve baskı etkisinin üstünlüğünü oluşturur. Wills (1985) çalışmasında aşındırma ve kesme etkilerinin öğütme işleminde ince tane üretmede, darbe ve baskı kuvvetlerine göre üstünlüğünü ortaya koymuştur. KD'lerin ince boyutta ürün verebilmesinde bir diğer önemli avantajı ise öğütücü ortam boyutunun geleneksel aktarmalı ortam değirmenlerine göre daha küçük boyutta olmasıdır. Büyük boyutlu öğütücü ortamın ince taneleri etkin bir şekilde yakalayıp kırması, küçük boyutlu öğütücü ortama göre daha zordur (Toraman 2015).

4.3.1 Karıştırmalı Değirmenlerde İncelenen Değişkenler ve Etkileri

Karıştırmalı değirmenler, öğütme için ihtiyaç duyulan enerjinin giderek arttığı günümüzde düşük enerji sarfıyatı ile özellikle cevher hazırlama endüstrisi için giderek parlayan bir umut haline gelmekte ve araştırmacılar bu cihazın geliştirilmesi için giderek artan bir ilgiyle çalışmaktadırlar. Karıştırmalı değirmenlerde genel olarak incelenen etkiler aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Karıştırma Hızı,
- Boncuk boyutu,
- Boncuk Yoğunluğu,
- Boncuk doluluk oranının Etkisi
- Boncuklar arası malzeme doluluk oranı etkisi,
- Pülpte Katı Oranı (PKO) ve pülp yoğunluğu,
- Beslenen cevher boyutu,
- Sürekli sistemde bulamacın akış debisi ya da kapasite; Kesikli sistemde öğütme süresi,
- Karıştırıcı sistem tasarımı (tip, şekil),
- Dikey çalışan KD'lerde yerçekiminin etkisi,
- Dağıtıcı katkılarının tipi ve miktarıdır (Pilevneli, 2003).

KD'lerde d_{50} boyutu 6 μm olan ürün 20 ton/h kapasiteyle öğütülebilmektedir (Mankosa et al. 1986). Aynı kapasite ve ürün inceliği için bilyalı değirmenlere göre % 60'lık bir enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Karıştırıcı dönüşlerinin çevresel hızları 3-18 m/s arasında değişebilmekte ve değirmenin karıştırıcı dışındaki etkin öğütme hacminin % 90'ına kadar ortam şarjı yapılabilmektedir. Aşağıda, KD'lerde incelenen değişkenlerin etkisi ayrı ayrı incelenmiştir.

4.3.1.1 Karıştırma Hızının Etkisi

KD'lerde karıştırma hızı arttıkça kırılma hızı artmakta ve ürün boyutu mikronize boyuta daha verimli bir şekilde getirilebilmektedir (Orumwense 1992, Pilevneli'den 2003). Karıştırma hızı öğütmeyi etkileyen en önemli değişkendir. Aynı özgül enerji tüketimi için yüksek karıştırma hızında % 12'lik daha fazla incelme meydana gelebilir (Kwade et al. 1996). Karıştırma hızı arttıkça elde edilen tane inceliği sürekli olarak artar ancak tüketilen enerjideki artış, ürün inceliğinin artışından çok daha fazladır. Bu nedenle, istenen ürün inceliğine göre karıştırma hızının optimum değerinin belirlenmesi öğütmede fazladan enerji tüketimini önlemek için en kritik konulardan biridir.

Karıştırma hızı arttıkça değirmenin çektiği güç doğrusal olarak artmaktadır. Bunun sonucunda değirmenin birim hacminde harcanan özgül enerji miktarında bir artış olmaktadır. Bu da, üründe istenen tane boyutu için öğütme süresinde belirgin bir azalmanın olmasını sağlamakta ve değirmen kapasitesinde bir artış gerçekleştirmektedir (Mankosa et al. 1989, Gao and Forsberg 1993, Tüzün 1994, Fadhel and Frances 2001, Dikmen ve Ergün'den 2004).

4.3.1.2 Boncuk Boyutunun Etkisi

Boncuk boyutunun incelendiği çalışmalarda ince boncuk kullanılması ile ürün tane boyutunun incelendiği görülmektedir. Bu eğilim, besleme tane boyutu ile orantılı olarak belli bir boncuk boyutu inceliğine kadar devam etmektedir. Daha ince boncukların kullanılması durumunda boncuklar besleme malı içindeki iri taneleri yakalayamamaktadır. Yapılan çalışmalarda, boncuk boyutu ile besleme malı tane boyutu arasındaki optimum oranın merdaneli kırıcılardaki kavrama açısı gözönüne alınarak 7:1 ile 20:1 arasında olduğu belirtilmiştir. Ayrıca ince taneli boncukların taneler ile çarpışmalarında sahip oldukları düşük momentum ile daha az enerji açığa çıkarmalarında öğütmeyi olumsuz etkileyebilmektedir (Mankosa et al. 1986, Tüzün 1994, Zheng et al. 1996, Dikmen ve Ergün'den 2004). Tüzün (1994) çalışmasında, karıştırma hızı ile

boncuk boyutunun öğütme performansı üzerinde içsel bir etkileşimi olduğunu gözlemiştir (Dikmen ve Ergün'den 2004) . Bu çalışmada, iri boncuk kullanılmasında düşük karıştırma hızının, ince boncuk kullanılması durumunda ise yüksek karıştırma hızının öğütme üzerinde etkili olduğu gösterilmektedir.

4.3.1.3 Boncuk Yoğunluğunun Etkisi

Karıştırmalı değirmende harcanan enerjinin büyük bir kısmı boncuk yükünün hareket ettirilmesi için kullanılmaktadır. Bu nedenle öğütme etkinliği düşürülmeden boncuk yoğunluğu düşürülebilirse enerji tüketiminde azalma sağlanabilir. Bu amaçla farklı yoğunlukta boncukların öğütme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Düşük yoğunluklu boncuk veya öğütücü ortam olarak (steatit, cam, otojen malzelemer vb.) kullanıldığında özellikle düşük karıştırma hızı ve iri besleme kullanıldığında yüksek yoğunluklu boncuk veya öğütücü ortama (demir, çelik vb.) göre daha verimsizdirler (Mankosa et al. 1989, Gao and Forsberg 1993, Tüzün 1994, Dikmen ve Ergün'den 2004).

4.3.1.4 Boncuk Doluluk Oranının Etkisi

Boncukların değirmen gövdesi içindeki doluluk oranının (miktarlarının) artmasının öğütme üzerindeki etkisi incelendiğinde, harcanan enerjinin büyük kısmının boncuk yükünü hareket ettirmede kullanılması nedeniyle tüketilen özgül enerjinin artacağı görülmektedir. Tüzün (1994) çalışmasında bilya şarjının ürün inceliği üzerindeki etkisini incelemiş ve aynı enerji tüketiminde boncuk doluluk oranının ürün inceliğini değiştirmediğini, fakat değirmenin çektiği gücü doğrusal olarak değiştirdiğini belirtmiştir (Dikmen ve Ergün'den 2004).

4.3.1.5 Boncuklar Arası Malzeme Doluluk Oranı Etkisi

Boncuk doluluk oranı, değirmene yerleştirildikten sonra boncukların aralarında kalan boşluk hacminin hesaplanması ve bu hacmin hangi oranda doldurulacağının bir ifadesidir. Bu boşluk tamamen öğütülecek malzeme ile doldurulursa % 100'lük bir malzeme doluluk oranı elde edilir. Pilevneli (2003) çalışmasında sabit karıştırma hızında (1120 d/dk), farklı boncuk doluluk oranlarının (% 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 ve 200) KD'de yapılan öğütme işlemine etkisini izlemiş ve aynı ürün inceliği için bu oranın artmasıyla öğütme için gerekli enerji ve sürenin arttığını gözlemiştir.

4.3.1.6 Pülp Yoğunluğu ve Visikosite etkisi

Besleme pülpünün (katı + sıvı) yoğunluğu (g/cm^3) pülp miktarının (kütlesinin) pülp hacmine oranı iken, pülpde katı oranı (PKO %), pülpdeki katı madde miktarının pülpün miktarına oranıdır. Dolayısıyla pülpde sıvı olarak su kullanıldığında bu iki kavram birbirine doğrudan bağlı farklı kavramlardır ve pülp yoğunluğundaki artış pülpde katı oranındaki artış olarak kabul edilebilir. Yapılan çalışmalar besleme pülp yoğunluğunun öğütme ürünü inceliği üzerinde bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Pülp yoğunluğundaki artışın ürün inceliğini arttırdığı gözlenmektedir. PKO'nun % 75'in üzerine çıkması durumunda taneler daha az kırılmaktadır. Bunun nedeni özellikle ince tane boyutlu besleme malının visikositesinin artmasıdır.

Visikosite bir malzemenin akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Visikositenin artması pülpün akışkanlığını düşüreceğinden pülp içindeki tanelerin birarada bulunma eğilimi artacaktır. Visikosite arttığında taneler öğütme koşullarında daha az serbest kalacaklarından öğütme işlemi güçleşir. Ayrıca, öğütme sırasında giderek inceliği artan taneler pülpün visikositesini arttırmakta ve öğütme işlemi güçleşmektedir.

Tanelerin birarada bulunmasına topaklanma denir. Topaklanma sonucu iyi bir karışım sağlanamaz ve öğütücü ortam ile taneler arasında yastıklanma etkisi sonucu yeterli temas oluşamaz. Bu olumsuzluğun giderilmesi için bazı öğütme yardımcısı maddelerin kullanılması gerekir. Öğütme yardımcıları özellikle, tanelerin yüzey elektrik yüklerinin birbirlerini nötrleştirmelerinin önüne geçmek için zeta otansiyellerini arttırıcı etki yaparlar. Bu etki sonucu taneler benzer elektrik yükleri ile yüklendikleri için birbirlerini iterler ve topaklanma eğilimleri azalır. Bu maddeler malzemelerin yüzey özelliklerine etki ederek dağıtıcı etki yaparlar ve pulpun visikozitesini düşürürlər. Öğütme yardımcıları olarak çok değerlikli inorganik tuzlar, Dow XFS 4272, sodyum oleat, trietanol amin, polikarboksilat, sodyum heksametafosfat gibi maddeler örnek olarak verilebilir.

4.3.1.7 Besleme Boyutunun Etkisi

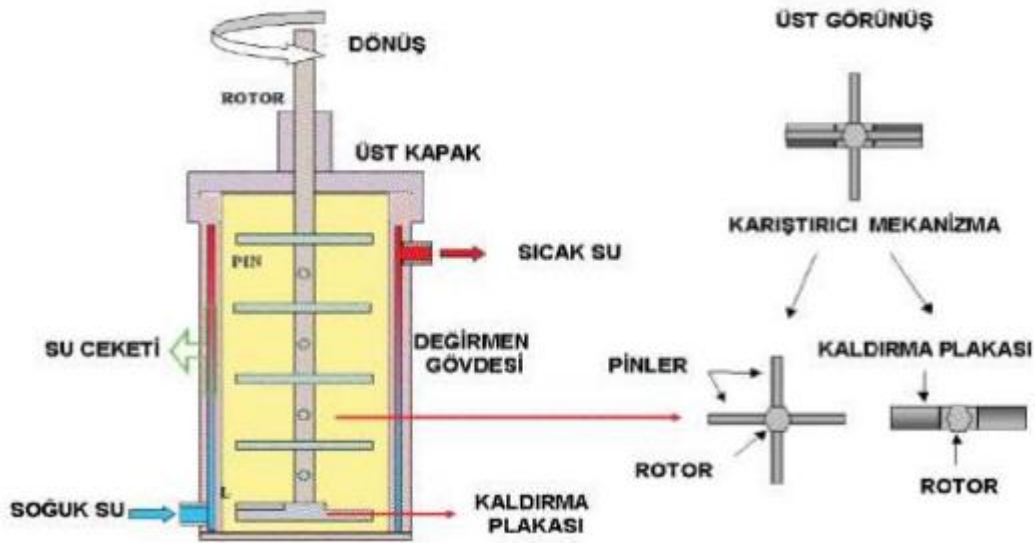
Karıştırmalı değirmenlerde etkili öğütme yapmak için besleme tane boyutunun $100\ \mu\text{m}$ 'den ince olması gereklidir (Yaung and Gao 2000, Pilevneli'den 2003). Geniş boyut dağılımına sahip bir besleme malı için, besleme boyutu arttıkça birim zamanda kırılan malzeme miktarı (kırılma hızı) artar. Orumwense 1992, Pilevneli'den 2003), deneylerinde besleme boyutu ile kırılma hızı

arasındaki ilişkinin ikinci dereceden bir polinomla ifade edileceğini göstermiştir. Fadhel and Frances (2001)'e göre, belli bir ürün inceliğini elde etmek için beslenen boyutun artmasıyla özgül enerji de artmaktadır (Pilevneli'den 2003).

4.3.2 Karıştırma Değirmenlerin Tasarım ve İşletme Özellikleri

KD'lerin en yaygın sınıflandırılma gövde ve karıştırıcı mekanizmalarının farklılığına göre yapılmaktadır. Karıştırma değirmenler, gövde ve karıştırıcı tipine göre diskli, pinli, halkalı helisel pervaneli değirmenler olarak olmak üzere sınıflandırılırlar (Orumwense and Forssberg 1992, Kwade 1999, Celep vd.'den 2008).

Şekil 4.5' de karıştırıcı mili değirmen gövdesi içine dik olarak inen dikey pinli karıştırma değirmenin ve karıştırıcı mekanizmasının şematik gösterimi verilmiştir. Bu çalışmada da laboratuvar ölçekli dikey pinli bir KD kullanılmıştır.



Şekil 4.5 Dikey pinli karıştırma değirmen şematik gösterimi (Hacıfazlıoğlu 2009).

KD gövdesinin karıştırma mekanizması çıkarıldıktan sonraki etkin öğütme hacminin genellikle % 70'i olmak üzere, % 85'e kadar öğütme ortamı ile doldurulabilir. Öğütme ortamı boyutu, besleme tane boyutuna ve türüne göre 0,2 ile 10 mm arasında olabilir. Öğütücü ortam olarak çelik ya da seramik bilya, çakıl veya mineral kökenli aşındırıcı malzemeler kullanılabilir (Celep vd. 2008). Öğütücü ortam karıştırma mekanizmaları ile değirmen gövdesi içerisinde 20 m/s

çevresel hıza ve dolayısıyla 50 katı bir yerçekimi etkisi oluşturabilecek bir santrifüj etki oluşturulabilir.

Öğütülen malzeme ve öğütücü ortamın birbirinden ayrılma şekline göre de KD'lerin farklı imalatları mevcuttur. Öğütücü ortamın değirmen gövdesinde tutulması için kullanılan yöntemlere göre, düz elekler, elek filtreler, döner ya da sabit silindirik elekler ya da döner çıkış boşlukları kullanılır. Kullanılan eleklerin ya da çıkış boşluklarının genişliği öğütücü ortam boyutunun yarısından az olmalıdır. İnce öğütme ortamının kullanımının artmasıyla öğütme ortamının tutulması amacıyla elek kullanımı döner çıkış açıklığına göre artmaktadır (Kwade 1999).

Öğütme işleminden sonraki endüstriyel işlemin özelliğine bağlı olarak, KD'ler yaş veya kuru olarak çalıştırılabilmektedirler. KD' de yaş öğütmede, sıvı yardımı ile incelmış tanelerin değirmen dışına taşınmasındaki kolaylık nedeniyle daha verimli bir öğütme gerçekleşmektedir. Yatay karıştırıcı tasarımlarında yaş öğütmeye gereksinim duyulmaktadır. Bunun nedeni, değirmenin kapalı öğütme gövdesi içinde belirli bir basınçta çalışırken malzemenin yatay kuru öğütmede askıda tutulabilmesindeki zorluklardır. Yatay karıştırma yapan değirmenlerde güç yoğunluğu, dikey tasarımlı KD'lere göre katlanarak artmaktadır (Sinnott vd. 2006).

KD'ler, karıştırma hızları düşük ya da yüksek olacak şekilde de sınıflandırılabilirler. KD'nin hızı karıştırıcının dönme eksenine en uzak olduğu uç noktanın çevresel hızı ile ifade edilir. Buna göre düşük karıştırma hızındaki değirmenler için bu hız 3 m/s iken, yüksek karıştırma hızında 15 m/s ve üzerine çıkmaktadır (Jankovic 2000).

4.3.3 Karıştırmalı Değirmen Modelleri

KD sınıflandırılmasında, karıştırma hızının düşük veya yüksek olması, değirmenin dikey ya da yatay konumlanması veya değirmenin cevher hazırlamada ya da ince toz endüstrisinde kullanılması gibi durumlara göre değişik modellerde KD'ler üretilmektedir. Tüm dünyada ticari olarak faaliyet gösteren yaklaşık bir düzine civarında KD modeli vardır. Bunlardan birkaçı cevher hazırlama endüstrisinde kullanılmakta iken bazıları da ise ince toz endüstrilerinde kullanılmaktadır. KD üretici şirketler ve ürettikleri modellere göre yaygın bir şekilde sınıflandırılmaktadırlar. Cevher hazırlama endüstrisindeki en önemli üreticiler, menşeleri ve KD modelleri şunlardır;

Swiss Tower Mills Minerals AG Tower mill ve High Intensity Grinding Mill (HIGMILL) modellerini üretmektedir. Bunlar düşük karıştırma hızlı dikey değirmenlerdir. Machinen Fabric Gustav Eirich (Almanya) kendi Tower Mill modelini üretmektedir.

Metso Mineral Corporationsa bağlı Metso Outotech (İngiltere) Verti Mill, Stirred Media Detritors (SMD) ve Outotech HIGmill modellerini üretmektedir. Bunlar, düşük karıştırma hızlı ve dikey çalışan değirmenlerdir. Verti Mill modeli Tower Mill modelleri aynı tasarım özelliklerine sahiptir.

The ANI Metprotech (Avustralya), Metprotech Stirred Vertical Media (SVM) modelini üretmektedir. Düşük hızlı ve dikey çalışan bir değirmendir.

Netzch Feinmahltechnik GmbH (Almanya) ISAMILL modelini üretmektedir. Bu değirmenler cevher hazırlama endüstrisinde kullanılan ilk yüksek hızlı ve yatay çalışan değirmenlerdir.

İnce toz endüstrisindeki önemli KD üreticileri için ise Union Process (ABD), Draiswerke GmbH (Almanya) gibi köklü şirketler sayılabilir. Union Process dünyada ilk üretilen KD modelidir. İlk olarak, düşük karıştırma hızlarında çalışmak üzere KD modelleri üreten firma, günümüzde yüksek hızda karıştırma yapan yatay ya da dikey çalışabilen, pigment, boya, kozmetik, deterjan ve yiyecek endüstrisinde büyük rağbet gören KD'ler üretmektedir.

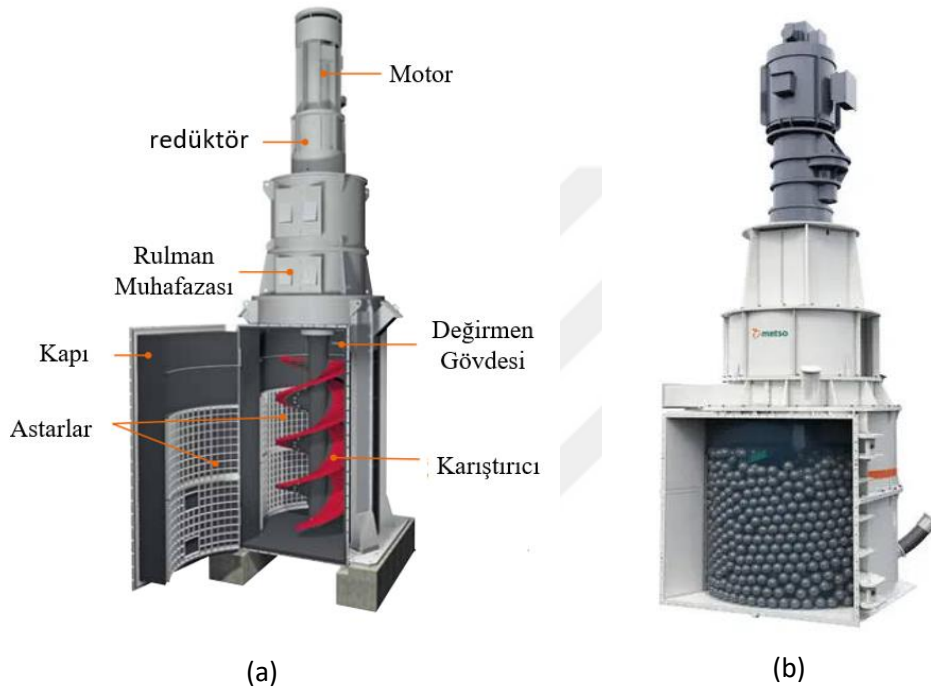
Tower Mill - Verti Mill

Tower mill cevher hazırlama endüstrisi için 1950'li yıllarda Japonyada Japan Tower Mill Company Ltd firması tarafından üretilen cevher hazırlama alanında kullanılan ilk düşük hızlı dikey değirmendir. Günümüzde, Swiss Tower Mill ve Eirich Tower Mill tarafından üretilmektedir.

Genellikle ana metal (bakır, demir, nikel kurşun gibi değerli metalin yanında görece yaygın bulunan metaller) madenciliğinde kullanılan bu değirmenler (Celep vd. 2008), kapalı devre çalışan öğütme sistemlerinde yüksek geri dönüş yükünü yeniden öğütmek için tasarlanmışlardır. Öğütücü ortam olarak 10-12 mm çaplı çelik öğütücü ortam kullanılmaktadır (Erb H vd 2016). Bu değirmenler ile 50 ton kapasite ile d_{80} boyutu 70 μ m ile 20 μ m arasında ürün elde etmede çok verimlidirler. Çelik öğütücü ortam yerine seramik bilya veya abrasif

mineral kökenli öğütücü ortam kullanılabilir. Bir gövde ve öğütücü ortamı karıştırmak için dikey konumlandırılmış spiral karıştırıcıdan oluşmuştur. Genellikle yaş öğütme uygulaması yapılmaktadır (Katırcıoğlu 2010).

Verti Mill modeli, Tower Mill ile aynı tasarım özelliklerine sahip değirmenlerdir. Günümüzde Verti Mill modeli İngiliz Metso Group tarafından üretilmektedir. Şekil 4.6 (a) ve (b)'de sırasıyla Tower Mill ve Verti Mill modellerinden birer görünüm sunulmuştur.



Stirred Media detritor (SMD)

Düşük hızlı, dikey hekzagonal gövdeye sahip pinli değirmenlerdir. Bu tür değirmenler akışkanlaştırılmış bir kum ortamını kullanan ince ve çok ince öğütme için dikey olarak tasarlanmış aşındırma değirmenleridir. Bir ana gövde içerisinde merkezi bir şaft ve bu şaft üzerinde karıştırıcı amaçlı pinlerden oluşmuştur. Özellikle öğütücü ortam nedeniyle kirlenmenin istenmediği kaolin ve kireç öğütme uygulamalarında ve ayrıca kurşun çinko tesislerinde olmak üzere bir çok uygulaması mevcuttur. Bu değirmenlere beslenen malzeme genel olarak d_{80} boyutu 100 μm veya daha incedir ancak bazı durumlarda daha iri de olabilir. Açık ve kapalı devre olarak çalıştırılmaya uygun öğütücü cihazlardır. Metso Mineral Corporation tarafından geliştirilmiştir. Yükseklik/çap oranı 1:1, karıştırıcı hızı 11 m/s, çok ince

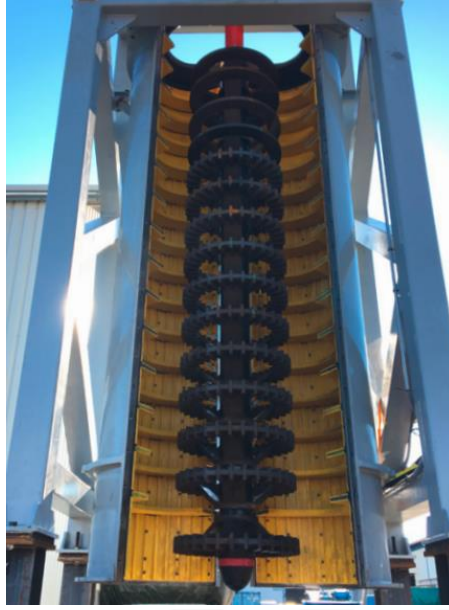
öğütmede besleme malı d_{80} boyutu 45 μm , ürün d_{80} boyutu 7.5 μm olabilir., özgül enerji tüketimi 34-37 kWh/t'dur. öğütücü ortam boyutu 1-2 mm'dir. En büyüğü 355 kW'lık bir motor gücü ile tesis edilmiştir (Katırcıoğlu 2010). Şekil 4.7'de karıştırılmalı ortam aşındırıcısı resmi gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Stirred Media Detritor (Metso 2013).

Outotech HIGmill

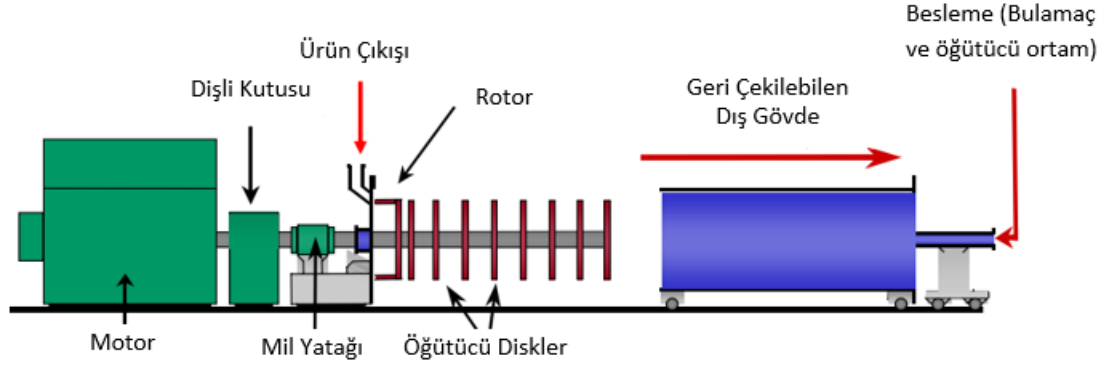
Bu değirmenler bir gövde, diskli karıştırıcı şaft, gövde iç kısmına bağlı statik disklerden oluşmuşlardır. Öğütücü ortam değirmen gövdesi etkin hacminin % 70'ne kadar doldurulur. Değirmene malzeme beslenmesi, gövde altındaki bir bağlantı ile yapılır. Malzeme yukarı doğru hareketi boyutunca öğütülür. Öğütülmüş malzeme gövde üst kısmından değirmeni terk eder. Uzun ve dar değirmen gövdesi öğütücü ortamın düzgün ve aynı oranda dağılmasına ve malzemenin öğütücü ortam ile daha yoğun temas etmesini sağlayarak kayda değer bir öğütme verimi sağlar. Şekil 4.8 de Outotech Higmill kesiti verilmiştir.



Şekil 4.8 Outotech HIGmill gösterimi (Outotech 2019).

Isa Mill (Isa yatay değirmeni)

Bu değirmen 1990 yılında Mount Isa Mining şirketi ve Netzch Feinmahltechnik GmbH şirketinin ortak girişimi ile faaliyete geçmiştir. Isa yatay değirmeni bir vites kutusu ve motor düzeneği ile sürülen bir mil üzerine bağlı sekiz öğütücü diskten oluşmuştur. Bu diskler 21-23 m/s çevresel hız ile 300 kW/m^3 güç yoğunluklarına ulaşabilir. Değirmen uygun bir öğütücü ortam ile doldurulur ve her bir disk arasındaki bölge öğütme odası görevini görür. Böylece art arda sekiz farklı öğütme odası oluşur. Öğütücü ortam, öğütücü disklerin hareketi ile merkezden değirmen iç gövdesine doğru hızlandırılır. Öğütücü ortam öğütücü disklerin arasında dışarı yönde hareketlendirilme yerine mil üzerine doğru geri yönde hareketlendirilir. Bu durum her bir öğütme odasında diskler ile öğütücü ortam arasında sürtünme ve aşındırma hareketini oluşturan bir dolaşım hareketi sağlar. Mineraller bu aşınma ve sürtünme mekanizması ile öğütülürler. Isa yatay değirmeninin tasarımı Şekil 4.9’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Isa-Mill şematik gösterimi (IsaMill 2008).

4.3.4 Karıştırılmalı Değirmenlerin Kullanım Alanları

Karıştırılmalı değirmenler, yukarıda sayılan üstünlükleri sayesinde;

Boya sektöründe cila vernik ve bazı dağıtıcı boyaların üretiminde,

- Kimya ve ilaç sektöründe çeşitli ürünlerin üretilmesinde,
- Elektronik sektöründe yüksek dayanımlı seramiklerin, elektronik bileşenler için gerekli bazı oksitlerin öğütülmesinde, sürekli mıknatıslar için gerekli sırların malzemelerinin üretiminde,
- Cevher hazırlama ve mineral endüstrisinde kireçtaşı dolgu malzemesi, kağıt kaplama, baca gazı kükürtsüzleştirme ve değerli minerallerin serbest hale getirilmesinde,
- Tarım kimyasalı olarak böcek ilaçları ve mantar ilaçlarının üretiminde,
- Yiyecek sektöründe kakao çekirdeği kabuğu, yer fıstığı ve susamın öğütülmesinde,
- Biyoteknolojide mikroorganizmaların hücrelerinin parçalanmasında, enzim çıkışının sağlanması için maya hücrelerinin parçalanmasında,
- Kauçuk endüstrisinde polimerlerin çözücü içerisinde çözünürlüğünün devamlılığının sağlanması için,
- Kömür ve enerji sahasında, kömür-yağ ve kömür-su karışımlarının elde edilmesinde, geleneksel öğütücülerin geri dönüş yüklerinin öğütülmesinde, gaz türbinleri için mikronize öğütmede, kömürün zenginleştirilmesi ve kükürtsüzleştirilmesi amaçları için çok sayıda kullanım alanı bulmaktadırlar (Stehr 1988).

KD’lerde kullanılan özgül enerji (10 – 2000 kWh/ton) büyük farklılıklar göstermektedir (Stehr, 1988) . KD’lerin kullanım alanları incelendiğinde ürün kalitesinin çok ince tane boyutuna gereksinim duyduğu nano teknolojilere doğru bir yönelim söz konusudur.



BÖLÜM 5

ÇİMENTO

Hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren maddelere çimento denir. Ancak çimento denilince ilk akla gelen Portland çimentosudur (PÇ). PÇ esas olarak, killi ve kalkerli maddelerin uygun oranlarda karıştırılması ve 1400 -1500 °C sıcaklıkta pişirilmesi ile katı parçacıklar halinde elde edilen klinkerin uygun oranda alçıtaşı ile birlikte öğütülmesiyle elde edilir (Yalçın ve Gürü 2006).

Çimento endüstrisi, tüm dünyadaki yapı ve inşaat sektörünün temelini oluşturan betonun ana maddesi çimentoyu üretmekte ve bu bakımdan en önemli ve stratejik sektörlerin başında gelmektedir (Elhasia vd. 2013, Eryanto' dan 2015). Yaklaşık 150 yıl önce üretimine başlanan çimento, başlangıçta PÇ'su olarak üretilmiş, ancak yarım asırdan daha uzun süredir, bileşimine farklı doğal ve yapay puzolanik maddelerin ilave edilmesiyle PÇ'sundan farklı özelliklere sahip çimentolar da üretilmeye başlanmıştır (Yalçın ve Gürü 2006).

Genel olarak çimento üretimi ikinci dünya savaşından sonra çok büyük bir hızla artmış ve günümüzde 4,5 milyar tonu geçmiştir. Bununla birlikte, çimento üretimi CO₂ salınımındaki en büyük etkenlerden biri haline gelmekte ve dünyadaki toplam CO₂ salınımının % 5 ila 7'sinden sorumlu olmaktadır (Eryanto and Amrina 2015).

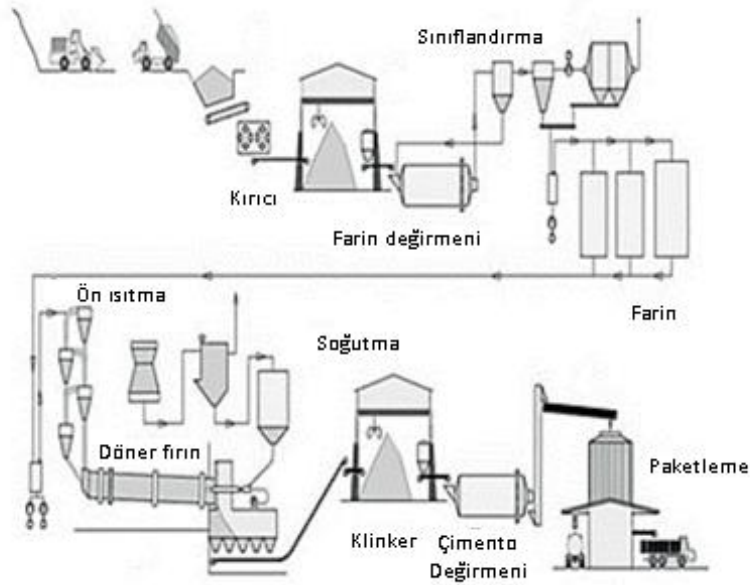
Çimento endüstrisi ayrıca, enerjinin en yoğun olarak kullanıldığı sektörlerdendir. Çimento üretimi, tüm dünyadaki elektrik enerjisi tüketiminin % 2'sine denk miktarda enerji tüketmektedir (Uson et al. 2013, Eryanto and Amrina'dan 2015). Bir ton çimento üretmek için 95 ile 110 kWh elektrik enerjisi tüketilmektedir (Harder 2003, Hoşten ve Fidan'dan 2008). Bu enerjinin yaklaşık % 70'i hammadde ufalanması (kırama, öğütme) ve klinker öğütmesinde kullanılmakta iken, sadece klinker öğütmenin payı ise % 40'ı bulmaktadır (Hoşten and Fidan 2008).

5.1 ÇİMENTO ÜRETİMİ

Çimento üretimi, birbirine bağlı, farklı kimyasal ve fiziksel dönüşüm işlemlerinin ayrı ayrı kademeler halinde uygulandığı, çok sayıda mühendislik uygulamasının faaliyet alanı bulduğu karmaşık bir işlemdir. Çimento üretimi 3 temel kademeden oluşmuştur.

- Hammadde üretimi ve hazırlama
- Klinker üretme (ön ısıtma, pişirme ve soğutma)
- Klinkerin öğütülmesi ve paketleme

Çimento üretimi, gerekli hammaddelerin doğal olarak bulundukları ortamlardan ocak işletmesi yöntemleri ile çıkarılması ile başlar. Çıkarılan hammaddelerin istenen oranlarda karıştırılması sonucu ilkel madde adı verilen malzeme elde edilir. Bir sonraki kademe, ilkel maddenin ufalanmasıdır. Öğütülmüş ilkel maddeye farin adı verilir. Farin malzemesinden, ön ısıtma ve pişirme gibi farklı yüksek sıcaklıklardaki işlemlerin sonucunda klinker malzemesi üretilir. Klinker malzemesinin soğutulmasının ardından, alçıtaşı ve çimento türüne bağlı olarak farklı katkı maddeleri ile tekrar öğütülmesi sonucu çimento malzemesi üretilmekte ve dökme veya torbalı olarak piyasaya sunulmaktadır. Genel olarak çimento üretiminin akım şeması Şekil 5.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Genel olarak çimento üretimi (Korkmaz 2019).

5.1.1 Çimento Üretiminde Kullanılan Hammaddeler ve Yardımcı Malzemeler

Çimento üretiminde kullanılan hammaddeler, ana hammaddeler ve mineral katkı maddeleri olarak iki ayrı grupta incelenebilirler. Ana hammaddeler, sedimanter kökenli kayalardan olan kalker (kireçtaşı), marn ve kil'dir. Katkı maddeleri ise çimento üretiminin farklı kademelerinde farklı amaçlar için kullanılan doğal ya da yapay yollardan elde edilebilen çeşitli hammaddelerdir. Bunun yanında, kimyasal içerikleri klinker bileşimine uygun, klinker ile birlikte öğütülen ve üretilecek betonun özelliklerini iyileştiren, çeşitli kimyasal katkıları da kullanılmaktadır.

5.1.1.1 Ana Hammaddeler

Çimento üretiminde kullanılan ana hammaddeler Kalker (veya kireçtaşı), kil ve marn kayalardır. Bu kayalar çimento klinkerinin elde edilmesi için gerekli dört temel bileşen olan kireç (CaO), silis (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'i oluştururlar.

Kalker

Kimyasal bileşiminde % 90'ın üzerinde kalsiyum karbonat (CaCO_3) bileşiği bulunan kayalardır. Kalker mineralojik olarak incelendiğinde saf halde kalsit (Hegzagonal CaCO_3) ve az miktarda aragonit (Ortorombik CaCO_3) kristallerinden oluştuğu görülür. Kalkerler doğada kalsiyum karbonat bileşiği yanında magnezyum karbonat (MgCO_3), kil mineralleri, demir silikat-oksit ve sülfürleri, silikat asidi (SiO_2) gibi bileşikler de içerirler. Orijinal halde sarı renktedir, ancak içeriğindeki diğer maddeler ve bileşikler nedeniyle kahverengi ve siyah renklerde de görülebilmektedir. Kalkerin sertlik derecesi mohs sertlik ölçeğinde 3' e karşılık gelir ve yoğunluğu 2,5 ile 2,7 g/cm^3 arasında değişir (DPT 2001).

Kil

Genel kullanım olarak mineralojik bileşiminde % 90'a kadar kil mineralleri bulunan kayalar olarak tanımlanabilir. Yerbilimciler killeri killer ve killi kayalar olarak iki farklı anlamda kullanılmaktadırlar. Çimento üretimi için gerekli alüminyum oksit Al_2O_3 , silisyum oksit (SiO_2), ve demir oksit Fe_2O_3 bileşiğinin kaynağı kil mineralleridir. Killer temel olarak Al_2O_3 , sulu alüminyum silikatlar, demir ve alkali elementler içermektedirler. Killerin kimyasal

analizlerinde Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 bileşiklerinin % ağırlıkları belirlenmelidir. Bunun nedeni, bu bileşiklerin birbirlerine göre belli oranlarının hazırlanacak farinin pişirme işlemini ve bundan üretilecek klinkerin kalitesini doğrudan etkileyebilecek olmasıdır (Pilevneli 2003).

Marn

Doğada % 50-70 oranında kalker ve % 30-50 arasında kil içeren kayaçlardır. Çimento klinkeri ortalama % 70 kalker ve % 30 kil içermektedir. Marn ise doğal haliyle bu karışım oranlarına sahip olduğu için çok uygun bir çimento hammaddesidir. Kalkerli marnın, kolay sökülebilir nitelikte yumuşak olması, işletme, öğütme ve pişirmede ekonomi sağlaması gibi avantajları vardır (Yalçın ve Gürü 2006).

5.1.1.2 Katkı Maddeleri ve Yardımcı Malzemeler

Çimento üretimi esnasında oluşan CO_2 salınımını azaltmak, çimento üretiminin farklı aşamalarında istenen koşulları sağlayabilmek ve farklı tür çimentolar elde etmek için çeşitli katkı maddeleri kullanılmaktadır. Çimento üretiminde kullanılan katkı maddeleri, klinker üretiminden önce ya da sonra kullanılabilirler. Bununla birlikte, üretilen çimento içine kullanımdan önce çeşitli yardımcı kimyasal katkı maddeleri de katılmaktadır.

Çimento ana hammaddeleri içinde klinker oluşumu için gerekli bileşenlerin (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) belirli oranlarda hazırlanması gereklidir. Ana hammaddeler içinde, bazı bileşenlerin yeterli olmadığı durumlarda, bu bileşen oranlarının hassas bir şekilde ayarlanması ve klinker pişirme koşullarını iyileştirme amacıyla kullanılabilirler. Bu amaçla, katkı maddesi olarak fırınlanmış pirit, düşük tenörlü demir cevheri, laterit, kuvarslı kum ya da metamorfik kayaçların bozunmasıyla oluşan kuvarslı malzemeler, kalker, uçucu kül ve boksit cevheri kullanılabilir.

Katkı maddelerinin kullanıldığı bir diğer aşama ise klinker elde edildikten sonraki aşamadır. Bu malzemeler genellikle puzolanik maddelerdir. Bu aşamada, farklı çimento tipleri üretmek ve klinkerin kimyasal bileşimini düzenlemek için değişik oranlarda katkı malzemeleri, genellikle klinkerle birlikte karıştırılarak öğütülürler. Bunlara örnek olarak, doğal ve ısıl işlem görmüş (kalsinasyon) puzolanlar, uçucu kül, taban külü, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pişmiş şist ve kalker sayılabilir. Ayrıca üretilen çimentonun, su ile tepkimesi (hidratasyon)

sonucunda çok hızlı donmasını (priz) geciktirmek için öğütme öncesinde klinker içine alçıtaşı ilave edilir.

Doğal ve Isıl İşlem Görmüş Puzolanlar

Volkanik faaliyet ürünü olan volkanik tüf ve tras doğal puzolanlardır. Bu puzolanlar P sembolü ile gösterilirler. Bazı durumlarda doğal puzolanların ısıtılma tabi tutularak aktifleştirilmesi gerekir. Bu puzolanlar da Q harfi ile sembolize edilirler. Puzolanların içinde en az % 25 oranında reaktif (amorf) SiO_2 bulunmalıdır.

Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırında demir üretimi sırasında oluşan cürufun ani olarak soğutulmasıyla granüle hale getirilmesiyle elde edilen ve başlıca SiO_2 , CaO , MgO ve Al_2O_3 'den oluşan bir yan üründür. Yüksek fırın cürufunun puzolanik çimento katkısı olarak kullanılabilmesi için $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ oranının 1' den büyük olması gereklidir.

Uçucu Küller

Pulverize kömür yakılan santrallerde baca gazına karışan toz halindeki küllerin elektrosatetik filtreler yardımıyla tutulması ile elde edilirler ve bu aşamada ani olarak hava ile temas sonucu soğutulmalarına bağlı olarak puzolanik reaktif özellik kazanırlar. Uçucu küller silissi (V) veya kalkersi (W) yapıda olmak üzere sınıflandırılabilirler. Silissi uçucu küller bileşiminde % 25'den fazla reaktif SiO_2 ve % 10'dan az reaktif CaO içerirler. Kalkersi uçucu küller ise % 25'den fazla reaktif CaO ve % 10'dan az reaktif SiO_2 içerirler. Uçucu küllerin kızdırma kaybı % 5'ten az olmalıdır.

Silis Dumanı

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında yüksek saflıktaki kuvarsın kömür ile birlikte elektrik ark fırınlarında indirgenmesinden oluşan amorf haldeki SiO_2 'ye silis dumanı denir. Silis dumanı kütleye en az % 85 oranında reaktif SiO_2 içerir. Silis dumanının puzolan olarak çimento üretiminde kullanımı için kızdırma kaybı % 4'den az olmalı ve özgül yüzey alanı $15,0 \text{ m}^2/\text{g}$ 'dan fazla olmalıdır (Yalçın ve Gürü 2006).

Pişmiş şist

Doğal haldeki şistlerin bir fırında yaklaşık 800 °C sıcaklıkta kızdırılması ile elde edilirler. Doğal haldeki mineralojik yapısına bağlı olarak, pişirildikten sonra bazı klinker bileşiklerine doğrudan sahip olurlar. Ayrıca puzolanik reaksiyon için gerekli SiO₂ bileşiğinede sahiptirler. Bu nedenle, PÇ gibi hidrolik özellikler yanında, ince öğütüldüklerinde puzolanik özellikler de gösterirler.

Kalker

Toz haline getirilmiş kalker, klinker içine de katılarak portland kalkerli çimento üretilebilir. Bu amaçla kullanılacak kalkerin kalsiyum karbonat %'si en az % 75 olmalı, kil oranı % 1,2'yi geçmemeli ve toplam organik karbon (TOC) yüzdesi % 0,50'yi geçmemelidir. Bu kalker L simgesi ile gösterilirken, TOC yüzdesi % 0,20'nin altında ise LL sembolü ile gösterilir (Yalçın ve Gürü 2006).

Alçıtaşı

Kimyasal bileşimi kalsiyum sülfat (CaSO₄) olan bir mineraldir. Alçıtaşının doğada en yaygın bulunan türleri, bünyesinde kristal su molekülü olmayan anhidrit (CaSO₄) ve bileşiminde iki molekül kristal suyu bulunan türü jipstir (CaSO₄.2H₂O = dihidrat). Alçıtaşının çimento üretimindeki kullanım amacı, çimentonun donma (priz) süresini geciktirmesidir. Bunun için % 3-6 arasındaki oranlarda jips ya da jips-anhidrit karışımları öğütme öncesinde klinkere ilave edilip öğütülerek katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Alçı taşı ile birlikte öğütme yardımcısı kimyasal maddeler de kullanılır.

5.1.2 Hammadde Üretimi ve Hazırlama

Hammadde genellikle açık ocak madenciliği ile üretilir. Hammaddelerin hazırlanması işlemi kuru veya yaş olmak üzere iki şekilde yapılabilir. Eğer hammaddeler su da kolay dağılma özelliği göstermiyorsa kuru yöntem tercih edilebilir. Eğer hammaddeyi oluşturan ana maddeler suda kolay dağılma özelliği gösteriyorsa ve % 20'inin üzerinde bir neme sahipse yaş yöntem tercih edilir. Yaş yöntem özellikle 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra rağbet görmeye

başlamıştır. Günümüzde en çok yaş yöntem ile çimento hammaddeleri hazırlanmaktadır (DPT 2001).

Kireçtaşı, Marn, kil, kum ve demir oksit ayrı ayrı kaynaklardan stok sahasına getirilir. Farklı kullanım alanları için farklı çimentolar üretilmektedir. Bu farklılığa göre hangi hammadde oranlarında isteniyorsa o oranlarda bir karışım hazırlanır.

Kalker ve kil mineralleri doğada hiçbir zaman saf halde bulunmazlar. Bu nedenle çimento bileşiminde, temel oksitlerin yanında çimento bağlayıcılığı özelliği olmayan magnezyum oksit (MgO), Sülfür (SO_3), alkali oksitler (Na_2O , K_2O) ve çözünmeyen katılar gibi minör bileşenler de bulunabilir (Yalçın ve Gürü 2006). Çizelge 5.1’de PÇ’su türlerindeki ortalama kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 Portland Çimentosu Kimyasal Bileşimi (Yalçın ve Gürü 2006).

Oksit Minerali	Sınır Değerleri %
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	2-4
MgO	1-4
K ₂ O,Na ₂ O	0,2-1,3
SO ₃	1-3
Kızdırma kaybı	1-2
Çözünmeyen kalıntı	1-2

Üretim ve istenilen oranlardaki karışımın ardından boyut küçültme işlemleri uygulanır. Hammaddelerin boyut küçültme işlemleri kırmayı takiben öğütme işlemi ile yapılmaktadır. Kırma işlemi genellikle iki aşamada yapılır. Genellikle şoklu veya çeneli kırıcılar ile iki kademedede gerçekleştirilir. Kırma işlemi ardından % 80’i 25 mm boyutunun altında (-25 mm) malzeme elde edilir. Kırılmış malzeme, konveyör adı verilen taşıyıcılarla öğütölmek üzere değirmenlere taşınır. Hammadde öğütme işlemi, bilyalı değirmenlerle ya da valsli değirmenlerle yapılır. Hazırlama işlemine göre kuru veya yaş olmak üzere iki şekilde yapılır. Öğütme işlemi sonucu % 75’ile % 90’ı 75 µm boyutunun altında (-75 µm) ürün elde edilir

(Pilevneli 2003). Böylece, çimento hammaddeleri karışımı, pişirme işlemine hazır farin malzemesi haline getirilir.

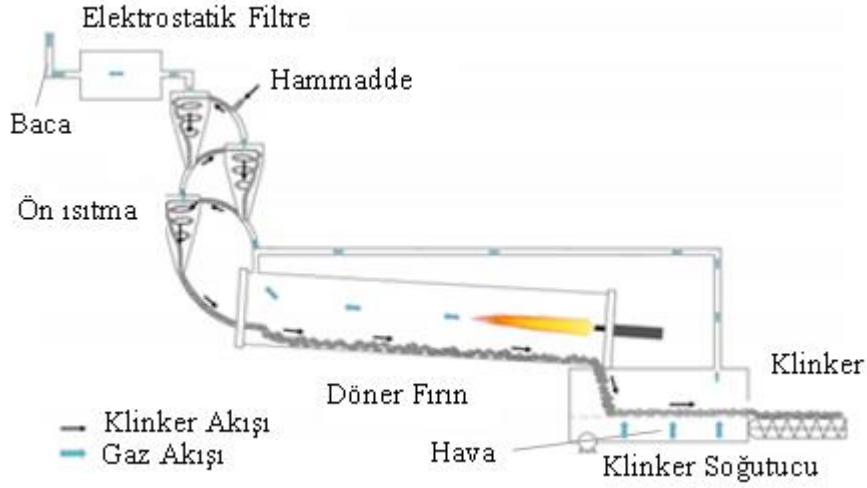
Hammadde üretimi ve hazırlanması tüm çimento üretimi içerisinde % 4 ila 10 arasında bir maliyet payına sahiptir. Bu işlem klinker üretme ve klinkeri öğütme işlemlerine göre göreceli olarak düşük bir paya sahip olsa da işlemin hassasiyeti kendinden sonra gelecek çimento üretim aşamalarını çok etkilemesi açısından büyük bir öneme sahiptir (Ergin vd. 1999).

5.1.3 Klinker Üretimi

Hammadde hazırlama işlemlerinden elde edilen farin karışımına bir ön ısıtma işlemi uygulanır. Ön ısıtma işlemi iki şekilde uygulanabilir. Bunlardan biri ızgaralı ön ısıtıcı sistemi (Lepol Sistemi), diğeri ise siklonlu ön ısıtma sistemleridir. Siklonlu ön ısıtma sistemleri (Humboldt sistemi) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yalçın ve Gürü 2006).

Bu sistemler yardımıyla farin karışımı 1000 C°'ye kadar ısıtılarak, plastikleşme ve nihai klinker oluşumu öncesinde kütlelerinin % 80-90'ı arasında bir kalsinasyona uğrarlar. Büyük oranda kalsine olmuş olan farin döner fırına girmektedir. Kalsinasyon işlemi bu fırınlarda en yüksek 1500 C°'ye kadar artan sıcaklıklarda pişirilerek tamamlanır ve en büyük tane boyutu 50 mm'ye kadar ulaşabilen plastikleşme özelliğine sahip klinker adı verilen gri renkli, camsı ve yaklaşık küresel şekilli malzemeler üretilir (Genç 2008).

Döner fırının dönüş hareketi, bir motor ile hareket ettirilen ve döner fırın silindirinin dış çevresi üzerine bağlanmış dişli halka vasıtası ile sağlanır. Döner fırın silindiri % 2-6 arasında bir eğime sahip ve dışı saçtan yapılmış, içi ateşe dayanıklı refrakter tuğla örülü, üretim kapasitesine bağlı çeşitli uzunluk ve çapta bir borudur (Bilgin ve Koç 2013). Döner fırının boyu 100 m'ye, çapı ise 3.5 – 4 m'ye kadar olabilir ve dönüş hızı ise 1 d/d'dir. Farin malzemesi fırının üst kısmındaki ucundan, yanma yakıtı ise fırının alttaki ucundan ateşlenerek fırın içerisine verilir. Burada fırın içerisinde birbirine göre zıt yönlü bir hareket mevcuttur. Bu ters yönlü hareket nedeniyle döner fırının çıkışına yakın bir noktada klinkerleşme işlemi gerçekleşir. Kalsinasyon işlemleri için gerekli ön ısıtma ve döner fırınlara ait bir örnek ve çalışma prensibi Şekil 5.2' de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Ön kalsinasyon ve döner fırın çalışma prensibi gösterimi (ÇŞB 2019).

Çalışan döner fırın dışına 1150-1250 °C sıcaklıkta çıkan klinkerin soğutulması gerekir. Bu işlem soğuk havanın klinker yatağı üzerine üflenmesi prensibi ile gezegen ya da kapı türü soğutucu ekipmanlar ile yapılır. Klinkerin sıcaklığı 80–120 °C'ye düşürülür. Bu soğutma işleminin hızı klinkerin öğütülmesine ve bu klinker ile üretilecek betonun dayanımına etki etmektedir. Klinkerin yavaş soğutulması kristal fazının daha fazla oluşmasını sağlar ve bu durum klinkerin öğütülebilirliğini kolaylaştırır. Hızlı soğutma ise klinkerin daha amorf bir şekilde oluşmasına neden olur. Bu durum da öğütmeyi zorlaştıran bir etkiye sahiptir (Genç 2008).

5.1.3.1 Klinker Oluşum Tepkimeleri ve Mineralojik Bileşimi

Farin içerisindeki çimento hammaddelerinden gelen CaCO_3 , MgCO_3 , kil ve su önce ayrışır, sonra klinker oluşumu sürecindeki tepkimeler ile tekrar birleşerek yeni bileşikler oluşturur. Ön ısıtıcıda, serbest suyun buharlaşması, kil bünyesindeki bağlı suyun serbest kalması ve MgCO_3 ve CaCO_3 'ün kısmen ayrışması tepkimesi gerçekleşir. MgCO_3 ve CaCO_3 'ün ayrışması kalsinasyon tepkimesidir. Genel olarak kalsinasyon tepkimesi Eşitli 5.1' de gösterilmiştir.



Fırında ise CaCO_3 ile MgCO_3 'ın ayrışması (kalsinasyonu) tamamlanır ve bu ayrışma sonucu oluşan kireç (CaO) ile SiO_2 ve Al_2O_3 birleşerek CaO içeriği yüksek ve klinker içinde farklı işlevlere sahip dört mineralojik bileşiği meydana getirirler. Bunlar, trikalsiyum silikat (C_3S), dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum aluminat (C_3A), tetrakalsiyum alumina ferrit (C_4AF) bileşikleridir. Bu mineralojik fazların terminolojisi Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Klinker içerisindeki bileşimler.

İsim	Kısaltma	Açık Formül	Mineralojik bileşen
Alit	C_3S	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Trikalsiyum silikat
Belit	C_2S	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	Dikalsiyum silikat
Aluminat	C_3A	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	Trikalsiyum aluminat
Ferrit	C_4AF	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	Tetra kalsiyum alumina ferrit
C: CaO , S: SiO_2 , A: Al_2O_3 , F: Fe_2O_3			

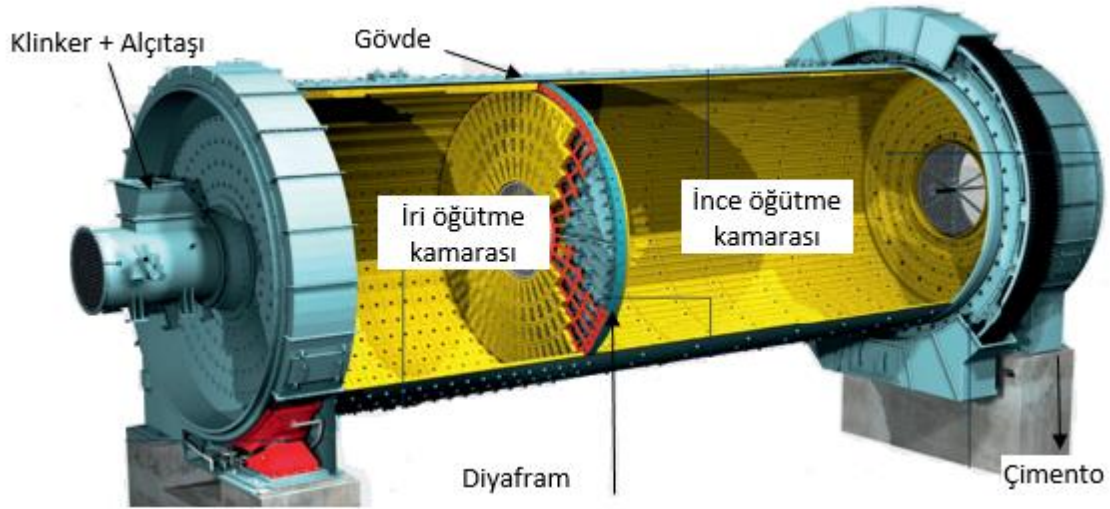
Bu mineralojik fazlardan alit ve belit, silikatları meydana getirirken, aluminat ve ferrit ise genel olarak aluminatları meydana getirir. Klinker bileşimindeki dört mineralojik faz içerisinde % 60 ile 69 arasındaki bir oranda kireç (CaO) bileşiği bulunmaktadır. Bu temel dört mineralojik faz ise klinker içerisinde toplamda en az % 90 oranında olacak bir kısmı oluşturur.

5.1.4 Klinker Öğütme

Klinker öğütme işleminde genellikle çift kamaralı bilyalı değirmenler kullanılır. İlk kamara ikinci kamaraya göre daha iri bilyalara sahiptir. Portland çimentosu, klinker, % 3-5 oranında alçıtaşı ve üretilecek çimento türüne göre uygun bir katkı malzemesinin çimento değirmenlerinde öğütülmesi ile elde edilir. Klinkere öğütme sırasında ağırlıkça % 3-5 arası kalsiyum sülfat (alçı taşı) katılması, çimentonun su ile karıştırıldığında kimyasal reaksiyonların ve katılaşma sürecinin kontrolü için gereklidir.

Bu değirmenlerde malzemenin % 80'i $90\ \mu\text{m}$ 'dan ince ürün elde edilecek şekilde öğütülür. Çimento değirmenleri öğütücü ortam olarak çelik bilye, silpebs vb. öğütücü ortamlar ile birlikte öğütme işlemini gerçekleştiren genellikle 3 m civarında bir çap ve 6-7 m uzunlukta çift kamaralı boru tipi değirmenlerdir. Öğütme işlemi daha çok bilyeli değirmenler ile yapılmaktadır.

Bu değirmenlerde ilk bölme, beslemenin yapıldığı uçtan başlayan ve tüm değirmen hacminin yaklaşık % 30'una karşılık gelmektedir. Bu ilk bölmede, ikinci bölmeye göre daha iri bilyalar kullanılmaktadır. İlk bölmedeki iri bilyeler, iri boyutlu besleme malzemesini kırmada etkindirler. Değirmenin ikinci bölümünde ise nihai öğütme işlemi tamamlanır. İkinci bölümde öğütülen malzeme birinci bölmeden incelmış olarak geldiği için daha ince bilye boyutları kullanılabilir. Böylece ikinci bölümde istenilen incelik elde edilir. İlk bölme kaldırma plakaları ile astarlanmıştır. İkinci bölme sınıflandırıcı plaka astarlarına sahiptir. Bölmeler arasında bir perde görevi gören diyafram içindeki ayarlanabilir kepçeler, ilk bölmeden ikinci bölmeye homojen bir malzeme geçişini sağlamaktadır. Öğütülmüş malzemeler mekanik bir şekilde ikinci bölme sonundan değirmen dışına alınmaktadır. Değirmene beslenen malzemeden kaynaklanan ya da öğütme işleminden kaynaklanan ısıнын değirmen içerisine düzgün bir yayılım içinde olması için her iki bölmeye su enjeksiyonu yapılabilir. (Genç 2008). Şekil 5.2' de bir çift kamaralı değirmenin iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Çift kamaralı bilyeli değirmeni kesiti (FLSmidt 2020).

Öğütme işleminin ardından bu ürün silolara gönderilir. Buradan farklı kullanım alanlarına göre dökme veya torbalanarak paketlenirler ve satışa sunulurlar.

5.2 HİDRATASYON TEPKİMELERİ VE BETON OLUŞUMU

Çimentoyu oluşturan klinker ve alçıtaşı karışımı, su ile hidratasyon adı verilen kimyasal bir tepkimeye girer. Tepkimede çimento içerisindeki temel bileşenler klinkerden gelen kalsiyum

silikatlar, kalsiyum aluminatlar ve alçıtaşından gelen kalsiyum sülfatlar olarak üç grupta incelenebilir. Bu temel bileşenler, farklı süreçlerde farklı bileşiklere dönüşerek çimento hamuru adı verilen su ve çimento karışımını meydana getirir ve ısı açığa çıkar. Temel hidratasyon tepkimesi Eşitlik 5.2’de gösterilmiştir.



Klinker malzemesi yüksek oranda kireç ($CaO = C$) bileşiğine, dolaylı olarak dört temel mineralojik bileşen (alit, belit, aluminat ve ferrit) şeklinde sahiptir. Bu bileşenler su ile hidratasyona girdiklerinde, kalsiyum silika hidrat (C-S-H), kalsiyum alumina hidrat (C-A-H) ve kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) bileşiklerini oluşturur. Kalsiyum silikat jelleri (C-S-H), çimento-su karışımının (çimento pastası) % 75’ini meydana getirir ve hidrate olmuş çimentonun dayanımı ve diğer özelliklerini büyük oranda etkilerler. Çimento hamuru içerisinde oluşan bu yeni hidratasyon ürünleri, bu hamurun zamanla sertleşmesine ve agrega bileşenlerinin bağlanmasına neden olarak betonu oluşturur.

Sadece çimento su ile karıştırıldığında çimento pastası adı verilen kuvvetli bir bağlayıcı maddeyi oluşturur. Çimento pastası, betonun temel hammaddelerinden olan ve agrega olarak bilinen kum, çakıl ve kırmataş karışımındaki taneleri sıkı bir şekilde bir arada tutar. Çimento pastası sadece ince agrega malzemesi (1-4 mm tane boyutunda) ile karıştırılırsa, tuğla ve taşların birlikte tutulmasına yarayan çimento harcını oluşturur. Eğer, hem ince, hem de iri agrega malzemesi (4-32 mm tane boyutunda) ile karıştırılırsa beton malzemesini oluşturmaktadır.

5.3 TSE STANDARTLARINA GÖRE ÇİMENTO TÜRLERİ

Genel olarak çimentolar Türk Standartları Enstitüsü 197-1 (TS EN 197-1) yönergesinde “CEM çimentosu olarak adlandırılmaktadır. Bu standarta göre CEM çimentosu, bileşimindeki CaO ve SiO_2 bileşiklerinin toplamı kütlece en az % 50 olması gereken çimentolar olarak tanımlanabilir. Bileşimi Portland çimentosu klinkeri, çeşitli mineral katkıları ve alçıdan oluşabilir.

Çimento türlerine göre içindeki bileşim oranlarının ayarlanması klinker, ana bileşen katkı ve minör ilave bileşenlerin çimento içerisindeki toplam miktarları esas alınarak yapılır. Bu üç

temel bileşenin çimento içerisindeki oranlarının toplamı % 100 olacak şekilde kabuller yapılır. Klinker içine katılacak alçı taşı bu oranlamanın dışındadır.

TS EN 197-1 standardı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplamaktadır:

- ❖ CEM I Portland çimentosu; Ana bileşen olarak sadece klinkerin kullanıldığı çimento türüdür. Klinker oranı % 95 -100 arasında değişebilir. Minör ilave bileşen oranı % 0-5 arasında olabilir.
- ❖ CEM II Portland -kompoze çimentolar : Klinker oranı en fazla % 94'e kadar çıkabilir. Klinker dışında en az bir tane % 6-35 arasındaki oranlarda diğer ana çimento bileşenine sahip Portland çimentosu türleridir. Bu farklı ana bileşen türüne göre isimlendirilirler.
 - Portland cürufu çimentolar, (yüksek fırın cürufu)
 - Portland Silis dumanlı çimentolar, (Silis dumanlı)
 - Portland puzolanlı çimentolar (doğal ya da kalsine puzolanlı)
 - Portland uçucu küllü çimentolar (silissi ya da kalkersi uçucu küllü)
 - Portland kalkerli çimentolar,
 - Portland pişmiş şistli çimentolar,
 - Portland kompoze çimentolar (klinker dışında belirli oranlar içinde çeşitli ana bileşen türlerine sahip olabilen çimentolar.
- ❖ CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimento : Ana bileşen olarak yüksek fırın cürufunun % 35 ile % 95 oranları arasında klinkerle birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimento türüdür.
- ❖ CEM IV Puzolanik çimento ; Ana bileşen olarak çeşitli puzolanların % 11-55 oranları arasında klinker ile birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimento türüdür.
- ❖ CEM V Kompoze çimento ; Ana bileşen olarak yüksek fırın cürufu, doğal ve kalsine edilmiş puzolan ve silis oranı yüksek silissi uçucu külün klinker ile birlikte öğütülerek elde edildiği çimentolardır.

Çimentolar için, 32,5, 42,5, 52,5 olmak üzere 3 standart dayanım sınıfı vardır. Bu sayılar, TS EN 197-1 standardına göre, çimentolardan elde edilen standart beton örneklerinin basınç dayanımı testlerine göre bulunmuş 28 günlük tek eksenli basınç dayanımlarının MPa cinsinden değerleridir. Her dayanım sınıfı için iki ayrı erken dayanım sınıfı vardır bunlar; N (normal erken dayanım sınıfı) ve R (yüksek erken dayanım sınıflarıdır) (Yeğinobalı 2003).



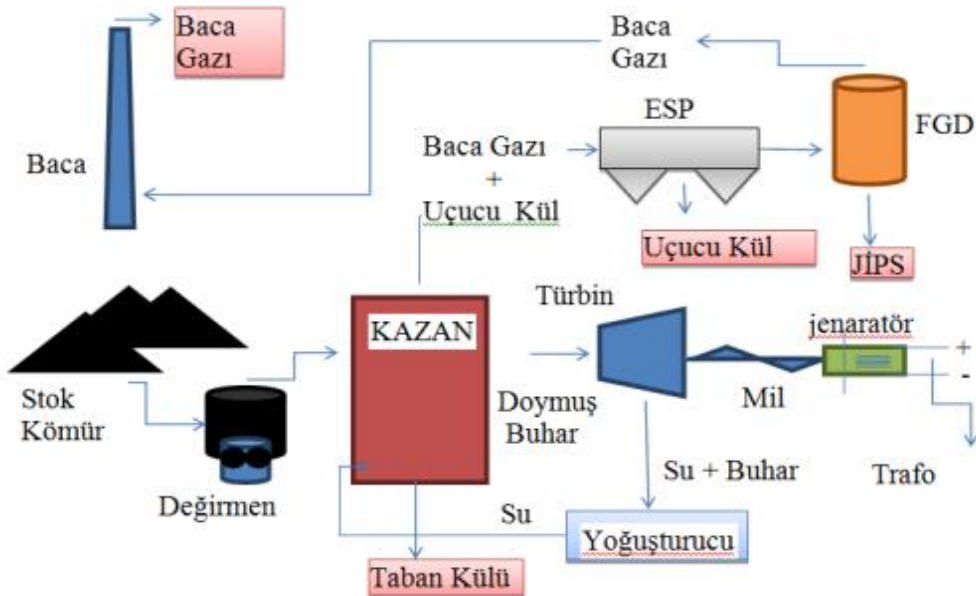
BÖLÜM 6

TERMİK SANTRALLER VE ATIK MADDELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Termik santraller, katı, sıvı veya gaz yakıtları kazanlarında yakarak elde ettikleri ısı enerjisini önce mekanik, sonra da elektrik enerjisine dönüştüren enerji üretim merkezleridir. Termik santrallerde yakıt kaynağı olarak kömür, doğal gaz, biyogaz, fuel oil, jeotermal enerji güneş enerjisi, nükleer yakıtlar ve evsel çöp atıkları kullanılmaktadır. Kömür yakıtlı termik santraller yakıt türüne göre en yaygın termik santraller olarak kabul edilebilir.

6.1 KÖMÜR YAKITLI TERMİK SANTRALLER

Kömür yakıtlı termik santraller, kendi içlerinde linyit, asfaltit ve taşkömürü yakan santraller olarak gruplandırılabilirler. Türkiyede, taşkömürü veya linyit yakıtı kullanan 39 adet termik santral bulunmaktadır (URL-2). Şekil 6.1’ de kömür yakıtlı bir termik santralin genel akım şeması verilmektedir.



Şekil 6.1 Kömür yakıtlı bir termik santralin genel çalışma şekli.

6.1.1 Kömür Yakıtlı Santrallerde Oluşan Atık Maddeler

Yanma işlemi sonucunda kömür yakıtlı termik santrallerde geriye kalan atık kütleyi, katı halde; uçucu kül, taban külü ve baca gazı kükürtsüzleştirme ürünleri (desülfojips) olarak, gaz halde ise azot oksitler (NO_x) ve kükürt dioksit (SO_2) olarak ele alabiliriz. Oluşan atık maddeler mevcut teknolojik şartlara göre ekonomik olarak değerlendirilebilecek ya da değerlendirilemeyecek olmalarına göre de sınıflandırılabilirler. Ticari olarak değerlendirilebilecek atık maddeler için, küller ve baca gazı kükürtsüzleştirme ürünleri örnek olarak verilebilir. Bu nedenle endüstrinin bazı alanlarında ticari olarak değerlendirilebilecek bu atık maddeler, termik santral yan ürünleri olarak da kabul edilmektedirler.

6.1.1.1 Termik Santral Külleri

Kullanılan kömürün cinsine göre toplam yakılan kömürün % 20'si ile 55'i arasındaki bir oranda kül artığı meydana gelmektedir (Kızılgut vd. 2010). Yanma sonucu oluşan bu külün % 80'i uçucu kül (UK), % 20'side taban külü (TK) olarak açığa çıkmaktadır (Güler vd. 2005). Türkiye'de kömüre dayalı termik santrallerden yılda 13 milyon ton UK ve TK atık madde olarak elde edilmektedir (Yüksek ve Kaya, 2017).

UK ve TK'leri, aynı kömürden oluşmaları nedeniyle benzer kimyasal özelliklere sahiptirler. Oluşum şeklindeki farklardan dolayı ise bazı fiziksel özellik farklarına sahiptirler. Termik santrallerde kömür yakıtı yakıldıktan sonra oluşan kül içerisindeki göreceli olarak ince boyutlu kısım, kazan içinde oluşan baca gazları ile kolayca santral dışına çıkabilecek uçucu külü meydana getirir. Uçucu küller; ince taneli (- 1 mm.) ve küresel şekilli, boşluklu yapıları, düşük sülfür ve yanmamış karbon içerikli atık maddelerdir. UK'lerin baca gazları ile birlikte atmosfere salıverilmesini önlemek için elektrostatik toz tutucu (ESP) sistemler ile tutulması en uygun yöntemdir.

Yakma işleminden sonra kömür içinde göreceli olarak iri tanelerden oluşan ve yerçekiminin etkisiyle yakma kazanının altında toplanma eğiliminde olan TK oluşur. TK'leri, yüksek tane boyutları ve dolayısıyla ağırlıkları nedeniyle baca gazı ile birlikte UK'ler gibi kazanı terkedemezler ve kazan altından kuru ya da yaş yöntemler ile toplanırlar.

Termik santral külleri kazan dışına çıktıklarında ani bir soğumaya maruz kaldıkları için düzgün bir kristal yapı gösteremezler ve camsı yapıda (amorf) oluşurlar.

6.1.1.2 Baca Gazı Kükürtsüzleştirme Ürünü (Desülfojips)

ESP yöntemiyle uçucu külden arındırılmış baca gazı içerisindeki SO₂ oranını azaltmak için farklı kükürtsüzleştirme (desülfürizasyon) işlemleri uygulanmaktadır. Termik santrallerde kullanılan en yaygın gaz kükürtsüzleştirme işlemi FGD (Flue Gas Desulfurization) yöntemidir. Bu yöntem sonucunda baca gazı içindeki SO₂ gazı bilinen alçı taşına (jips) büyük benzerlik gösteren yapay jips (desülfojips) halinde elde edilmektedir (Sert ve Yurteri 1990).

6.2 TERMİK SANTRAL KÜLLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Termik santrallerde 1 kWh'lık enerji üretimi başına 110 gr kül oluşumunun meydana gelmesi, basit bir hesaplama 1000 MW'lık bir termik santralde yıllık 650.000 ton UK ve TK oluşması anlamına gelir ki, bu miktardaki külün depolanması için her yıl 60.000 m²' lik bir yeni arazi alanının tahsis edilmesi gerekir (Kaya ve Yüksek 2017). Bu durum, termik santral küllerinin değerlendirmesini dikkate değer bir konu haline getirmektedir.

Termik santral küllerinin değerlendirilmesinde en etkin yaklaşım, bu küllerin farklı işletme sahalarında kullanılmasıdır. Bu sahaların başında da inşaat sektörü gelmektedir.

İnşaat sektöründe, özellikle uçucu küller katkılı çimento üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çimentoların farklı katkıları ile harmanlanarak kullanımı Avrupada yaygınlaşmaya başlamıştır ve müsaade edilen çevresel etki sınırlamalarının azalması nedeniyle katkılı çimentoların tüketimi artmaktadır (Fonteboa et al. 2017). İnşaat sektöründe hem UK, hem de TK'nün diğer kullanım alanları; asfalt betonu, kaldırım malzemeleri, toprak dolgu yapımı ve jeopolimer üretimidir (Priyadashini et al. 2011).

Termik santral külleri inşaat sektörü ve çimento üretimi dışında, tarım sektöründe, toprak ıslahında ve kimya sektöründe özellikle arıtma işlemlerinde, plastik sektöründe mineral dolgu işlemlerinde, boya ve refrakter malzeme üretiminde ve sondaj çimentosu üretiminde kullanım alanına sahiptirler (NTPC 2011).

6.2.1 Termik Santral Küllerinin Çimento Üretiminde Kullanılması

Termik santral külleri, klinker ya da çimento içinde belirli ikame oranlarında kullanılarak kullanılmaktadır. Klinker içerisine belli oranlarda katılarak katkı çimento üretiminde ya da çimento içerisine belirli oranlarda katılarak beton üretiminde kullanılabilirler. Bazı durumlarda klinker pişirmeden önce çimento hammaddesi olarak da klinkerin pişirme sıcaklığını düşürme amacıyla kullanılmaktadırlar.

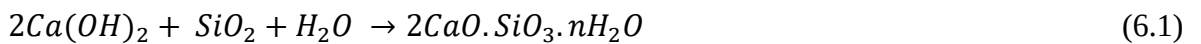
Termik santrallerden yaklaşık çimento inceliğinde elde edilen UK'lerin düşük yoğunlukları nedeniyle çimento fabrikalarına kadar taşınıp burada klinkere katılması bazı teknik sorunlar oluşturur. Bu nedenle uçucu küllerin çimento içerisine inşaat şantiyesinde katılması pratikte tercih edilmektedir (Yalçın ve Gürü 2006).

TK'leri ise doğal oluşumlarında çimento inceliğinde olmadıkları için çimento ikamesinde doğrudan kullanılamazlar (Jaturapitakkul and Cheerarot 2003). Bu amaçla kullanılacak taban külünün, öğütülmesi gereklidir (Fonteboa et al. 2017).

6.2.2 Puzolanik Aktivite ve Küllerin Beton Üretimindeki Puzolanik Etkileri

Puzolanik aktivite, kendi başına çok az ya da hiç bağlayıcılık özelliğine sahip olmayan malzemelerin, ince taneler halinde ufalandıklarında, uygun nem ve sıcaklıkta bağlayıcılık özellik kazanabilmesidir. Bu özelliği gösteren malzemelere puzolanik malzemeler ya da puzolanlar adı verilir.

Puzolanlar, içerdikleri reaktif silis ile çimento hidratasyonu sonucu oluşan serbest kireç (Ca(OH)_2) ile sulu ortamda tepkimeye girerler. Bu tepkime temel puzolanik tepkime olarak bilinir. (Yalçın ve Gürü 2006). Tepkime Eşitlik 6.1'de gösterilmiştir.



Puzolanlı çimentoların hidratasyonu da Portland çimentosuna benzer bir şekilde yürür. Daha sonra puzolanlar ile oluşan serbest kireç arasında çok yavaş yürüyen puzolanik tepkime başlar.

Küller, oluşumlarındaki ani soğuma nedeniyle, camsı ve dolayısıyla düzensiz kristal yapıda meydana gelerek, serbest halde reaktif silis ve reaktif alumina içermektedirler. Küller, yapılarındaki yüksek miktardaki reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 bileşikleri ile çimento hidratasyonu sonucu fazladan oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile puzolanik tepkimelere girerek, hem ortamdaki kireç miktarını azaltırlar, hem de puzolanik tepkimeler ile bağlayıcı bileşenler olan jellerin (C-S-H ve C-A-H) ilave olarak meydana gelmelerini sağlar.

Çimentonun su ile hidratasyon tepkimesi ısı veren bir tepkimedir. Beton oluşumu esnasında oluşan ısı, ortamdaki suyun buharlaşmasına ve ortamdan hızlı bir şekilde uzaklaşmasına neden olur. Buharlaşan su çimento içerisinden uzaklaşırken kendine yol açmaya çalışır ve kontrol edilmesi zor olan bir gözeneklilik oluşmasına neden olur. Çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan kirecin küçük bir miktarı ortamdaki asitlik derecesini düzenleyici etkiye sahip iken, büyük bir bölümü ise kullanılmayan fazlalık bir kireç oluşumu halinde kalır (NTPC 2011). Serbest halde bulunan fazlalık kireç, oluşan bağlayıcı jellere göre çok daha iri boyut ve düzgün kristal yapıya sahiptir. Kireç, hem suda kolay çözünüp buharlaşan suyun oluşturduğu mikroçatlaklardan sızma eğilimindedir, hem de beton içerisinden sızmasa bile betonun içinde kendi iri ve düzensiz şekilleri nedeniyle gözenekli bir yapının oluşmasına ilave bir etki sağlar. Puzolanların çimento yerine kullanılması ve buna bağlı olarak çimento miktarının azalması nedeniyle daha az miktarda ısı ortaya çıkacaktır. Hidratasyon tepkimesinde çıkan ısının azalması, betonun kütlesi içinde ısı gerilimleri düşüreceğinden, daha az mikroçatlak oluşumuna neden olacak ve daha yüksek dayanım sağlayacaktır.

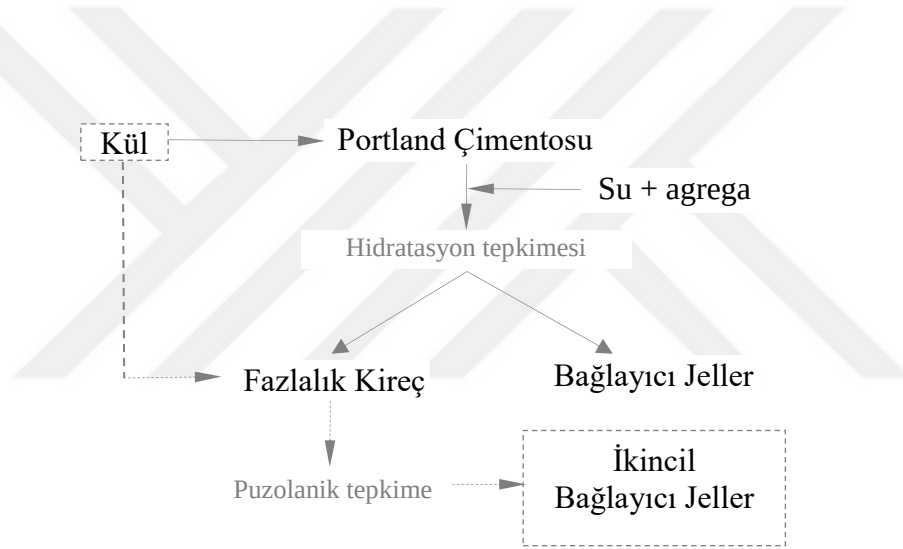
Küller serbest halde bulunan puzolanik tepkimeler ile kireci bağlayıcı jellere dönüştürdüklerinde, kirecin oluşturduğu gözeneklerin ve sızma eğiliminin oluşma şansı azalır ve bu gözenekler büyük oranda ilave jeller tarafından doldurulurlar.

Uçucu küller genel olarak küresel şekilli tanecikler olduğu için, üretilen betonun içindeki bileşenler arasında ve taşındığı borular arasındaki sürtünmeyi azaltıp betonun işlenebilirliğine pompalanabilirliğine olumlu katkıda bulunurlar. Taban küllerinin de öğütme sonucu küresel taneciklere sahip olduğu bazı araştırmalarda belirtilmektedir (Cheriaf et al. 1999, Kula vd. 2002, Hyeong'dan 2015).

Küllerin kullanımı ile beton içindeki gözeneklilik azaltılır. Fazla kirecin puzolanik tepkimeler ile azaltılması, betonda karbonizasyon, sülfat ve klorit atakları gibi çevresel etkilere karşı

dayanıklılığa ve betonun içinde hacim genişlemesine yol açarak alkali tepkimelerinin azalmasına olumlu katkılar yapmaktadır.

xBeton içerisinde ikame edilen külün tamamı bu etkiyi yapmaz. Bu tepkimeler dışında kalan küller ise doğal olarak (uçucu külde) ya da yapay olarak da (taban külünün öğütülmesiyle) ince taneli yapısı ile mikro agrega olarak çimento harcı ve dolayısıyla beton içerisinde dolgu etkisine (paketleme etkisi) yardımcı olur. Çimento ikamesi olarak kullanılan küllerin inceliği, çimentonun genel olarak inceliğini azaltarak su ihtiyacını azaltır (Su/Çimento oranı) ve betonda fazla suyun betonun üst kısmında toplanması anlamına gelen terleme olayını azaltır (Çağlayan vd. 1999). Küllerin ikamesi işlemini ve puzolanik tepkimesini ifade eden akım şeması Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Çimento içine kül ikamesi ve bağlayıcı jellerin oluşumu.

Puzolanik tepkime, puzolanların yüzeyinde oluştuğu için, incellik artarsa puzolanik aktivite de artar. Puzolanik malzemelerin Portland çimentosu içerisindeki etkinliğinin ölçüsü olarak çeşitli uluslararası standartlara göre belirlenen ve puzolanik aktivite indeksi (% PAI) adı verilen bir dayanım oranı kullanılmaktadır. Bu oran puzolan ile ikame edilmiş çimento ile hazırlanan betonun, sadece Portland çimentosu ile hazırlanmış beton örneğinin (kontrol betonu) tek eksenli basınç dayanımına oranıdır. Türk standartlarına göre (TS EN 197-1) puzolan ikame oranı % 25 ve puzolanlı beton örneği için kabul edilebilir dayanım oranı (% PAI) % 70’tir. % PAI oranının bulunması deneysel çalışmalar bölümünde irdelenmiştir.

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tezdeki deneysel çalışmalar, deney ön hazırlıkları, taban külü numunelerinin karıştırmalı değirmende öğütülmesi, öğütülmüş numunelerin yoğunluk analizlerine bağlı olarak özgül yüzey alanlarının belirlenmesi ve son olarak puzolanik aktivite indeksi değerlerinin belirlenmesi şeklinde gruplandırılabilir. İlk olarak deneylerin yapıldığı laboratuvarlar ile kullanılan malzemelerin ve cihazların özellikleri verilmiştir.

7.1 LABORATUVAR DONANIMI

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Yakup KESKİN Cevher Hazırlama Laboratuvarında mevcut bulunan; etüv, terazi, konili kırıcı, merdaneli kırıcı, kesikli karıştırmalı değirmen, standart Bond değirmeni, enerji ölçümü için üç fazlı sayaç, değirmenler için akım düzenleyici (Inverter), beton kalıpları, harç karıştırma makinesi, kalıp sarma makinesi, ayrıca iri boyutta boyut analizi için ASTM elek analiz seti halinde laboratuvar elekleri, 0,1 gr hassasiyetli dijital terazi, kaya mekaniği laboratuvarında beton kalıplarını suda bekletmek için gerekli aygıtlar ve beton için kür odası, yoğunluk analizi için hava sıkıştırırmalı piknometre, beton örneklerini kesmek için kafa kesme makinesi, tek eksenli basınç dayanımı makinesi, öğütülmüş malzemelerin tane boyut dağılımlarını ölçmek için “Malvern Mastersizer S2000” lazer boyut analiz cihazı ve İnşaat Mühendisliği Bölümü hidrolik laboratuvarlarında öğütülmüş malzemelerin özgül yüzey alanlarını belirlemek için manuel Blaine manometresi, bu tez çalışmasında kullanılan temel deneysel donanımlardır.

7.2 DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler, beton bileşimi içinde bağlayıcı kısmı oluşturan malzemeler ve beton örnekleri hazırlanırken gerekli sarf malzemeleridir. Beton içindeki bağlayıcı kısım için kullanılan malzemeler, Portland Çimentosu ve Portland Çimentosu ikamesi

için kullanılacak puzolanik malzemelerdir. Puzolan olarak kullanılacak malzemelerde aranan kimyasal özellikler Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Puzolanik malzemelerde istenen kimyasal özellikler (Yalçın ve Gürü 2006).

Bileşim	Sınır Değer, %
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> % 70
SO_3	< % 5,0
CaO	< % 7,0
MgO	< % 4,0
Alkali oksitler (Na_2O eşdeğeri olarak)	< % 1,5
Kızdırma kaybı	< % 12

Bu çalışmada, ikame malzemesi olarak; taban külü, uçucu kül ve silis kumu örnekleri kullanılmıştır. Çizelge 7.2’ de bu malzemelerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 7.2 Bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimleri.

Bileşen %	Taban Külü (- 0,5 mm)	Silis Kumu	Portland Çimentosu	Uçucu Kül
SiO_2	53,51	$\cong 98,3$	16,13	57,88
Al_2O_3	27,57	$\cong 0,7$	4,54	22,13
Fe_2O_3	7,49	$\cong 1,3$	3,87	8,98
CaO	6,04	-	67,64	2,15
MgO	1,34	-	1,57	2,03
Na_2O	0,32	-	0,38	1,25
SO_3	0,48	-	4,18	0,91
Diğer	3,25	-	1,69	4,67
L.O.I	2,04	-	-	$\cong 2,5$

LOI : Loss On Ignition % (kızdırma kaybı)

TK’lü ve UK, puzolanik özellik göstermek için gerekli kimyasal bileşim oranına sahiptirler. Silis kumu ise puzolanik özelliğinden çok, kontrol amacıyla kullanılmıştır. Betonlar hazırlanırken kullanılan sarf malzemeleri ise agrega malzemesi olarak standart rilem kumu ve saf sudur.

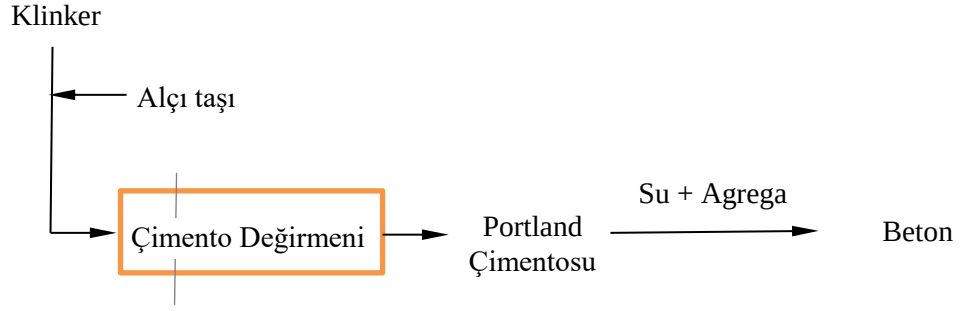
7.2.1 Malzemelerin Temini ve Genel Bilgiler

Zonguldak Eren Enerji Termik Santralının 615 MW Super Kritik Pülverize Kömürlü kazanlarından , yaklaşık 260 kg taban külü malzemesi temin edilmiştir. Zonguldak Eren Enerji Termik Santrali (ZETES) Zonguldak ili, Çatalağzı Belediyesi sınırları içinde bulunmaktadır ve 2790 MW'lık kurulu güce sahiptir. Bu santral sahasında, 1 adet 160 MW kurulu gücünde akışkan yatak teknolojisine sahip santral ünitesi, 2 adet 615 MW ve 2 adet 700 MW olmak üzere 4 adet Super Kritik Pulverize Kömürlü Santral üniteleri bulunmaktadır.

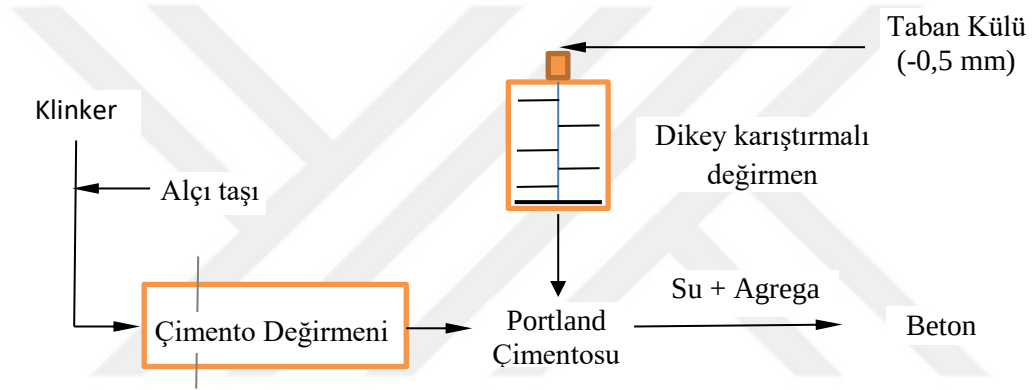
Santral sahasında, kömür tüketim miktarı (tüm üniteler devredeyken) yaklaşık 23.000 ton/gün (700.000 ton/ay) civarındadır. Santralde kullanılan kömür ağırlıklı olarak Kolombiya kömürüdür. Bu kömür yaklaşık % 10-15 kül, % 10 nem ve yaklaşık 5800-6000 kcal/kg ısı değere sahiptir. Santralde yanma sonucu oluşan külün de yaklaşık % 10'u taban külü, geri kalanı ise uçucu kül olarak elde edilmektedir. Bartın Çimento fabrikasından puzolanik aktivite testlerinde kullanılmak üzere 2 torba çimento (CEM I 42,5R Portland çimentosu) temin edilmiştir.

7.2.2 Yöntem

Bu çalışmada, çimentonun beton üretimindeki mevcut kullanımına farklı bir yaklaşım getirmek amaçlanmıştır. Bu başlık altında, istenilen yöntemin kısa ve şematik bir yaklaşımı tanıtılacaktır. Şekil 7.1'de çimentonun üretiminden itibaren beton üretimindeki mevcut kullanımı ve Şekil 7.2'de taban külünün karıştırılmalı değirmende öğütülerek mevcut yönteme dahil edilmesi işlemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.1 Çimentonun mevcut durumda beton üretiminde kullanımı.



Şekil 7.2 Çimentonun taban külü ikamesi ile beton üretiminde kullanımı.

7.3 DENEY ÖN HAZIRLIKLARI VE ANALİZ İŞLEMLERİ

Ön hazırlıklar numunelerin ve gerekli malzemelerin temin edilmesi, karıştırıcı bilyeli değirmende öğütme boyutuna getirmek için ufalanması ve deney sayısına göre paketlenmesi, malzemenin öğütülebilirliğinin incelenmesi, malzemelerin boyut, nem ve yoğunluk analizlerinin yapılması ve özgül enerji analizleri olarak alt bölümlerde incelenebilir.

Öncelikle çok sayıda kuru öğütme deneyleri yapılacağı düşünülerek, TK'nün tamamı etüvde yaklaşık bir gün bekletilerek kurutma işlemine tabi tutulmuş ve nem oranı % 22,17 olarak ölçülmüştür. Bunun ardından kurutulmuş malzemedan alınan temsili bir örnek ile yapılan elek analizi sonucu, taban külünün tane boyut dağılımı belirlenmiş ve Çizelge 7.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.3 Taban külünün elek analizi sonuçları.

Boyutlar mm.	Ağırlık %	Σ EA %	Σ EÜ %
+ 20,00	2,81	100,00	2,81
- 20,00 + 6,70	24,40	97,19	27,21
- 6,70 + 3,15	19,98	72,79	47,19
- 3,15 + 2,36	5,48	52,81	52,67
- 2,36 + 1,00	19,65	47,33	72,32
- 1,00 + 0,50	3,77	27,68	76,09
- 0,50	23,91	23,91	100,00
Toplam	100,00		

Kurutulan taban külü malzemesinin yaklaşık dörtte üçü karıştırmalı değirmende öğütme için belirlenen 0,5 mm tane boyutu altına konili ve merdaneli kırıcılar ile kademeli olarak kırılmıştır. Her bir öğütme testinde kullanılan örneğin birbirine mümkün olduğunca benzeyebilmesi için 0,5 mm altına ufalanan taban külü büyük bir titizlikle ana kütleinin temsiliyetini bozmayacak ve önceden belirlenen öğütme deneyi sayısını karşılayacak şekilde paketlenmiştir.

Malzemenin kırılması ve öğütülmesinde harcanan özgül enerjinin belirlenmesinde malzemenin öğütülebilirliği hakkında bir veri oluşturabilmek için çalışmada kullanılacak taban külünün Bond iş indeksi hesaplanmıştır.

7.3.1 Bond Deneyinin Yapılışı

Öncelikle indeksi hesaplanacak 6-8 kg ağırlığındaki malzemenin tamamı 3,35 mm (6 mesh)'lik elekten geçecek şekilde kırılır. Bu malzemedan hassas bir numune bölme işleminin ardından yaklaşık 500 gr'lık bir numune alınır ve bu numune uygun bir elek serisinden elenir. Malzemenin kırılması çok dikkatli ve kademeli bir şekilde yapılmalı ve kırılmış malzemenin % 80'inin yaklaşık 2000 μm ($X_{80} = 2000 \mu\text{m}$) civarında olduğu elek analizi ile teyit edilmelidir. Deneylerde önceden bir kontrol elek boyutu (P_i) seçilir (genel olarak 75 veya 106 μm). Kontrol eleği elek serisindeki en küçük elek boyutu olmak üzere elek serisi hazırlanır. Elek serisindeki en büyük elek boyutu 2 mm'den daha büyük bir elek boyutu olarak seçilebilir (genel olarak 2,36 mm). elek serisi genel olarak 7 elekten oluşur. Kırılmış malzeme iyice karıştırılıp içinden genelde 2000 cm^3 'lük bir ölçekli kap içinde 700 cm^3 'lük bir hacim kaplayacak şekilde tekrar

numune alınır ve bu hacim üç kademedede ölçekli kaba yerleştirilir ve her seferinde ölçekli kap düzgün bir yerleşmenin sağlanması için aşağıdan bir düz zemin üzerinde çarptırılır. Bu numune 700 cm³ seviyesine geldiğinde önce tartılır ve önceden öğütücü ortamı içine yerleştirilmiş Bond değirmeni içine beslenir. Değirmen içindeki öğütücü ortamın hareket edemeyeceği ve öğütme yapamayacağı en düşük dönüş hızı olan kritik hızın (V_k) % 85'ine karşılık gelen 70 d/dk hızda 100 devir çevrilerek öğütme işlemi gerçekleştirilir. İşlemin ardından, öğütücü ortam ve öğütülmüş malzeme uygun bir ayırıcı aygıt ile birbirinden ayrılır ve malzeme kontrol eleğinden elenir. Kontrol eleği altına geçen malzeme oranına göre miktarı gr cinsinden hesaplanır ve öğütme öncesinde besleme malının kontrol eleği altına geçen miktar (gr) ile karşılaştırılır. Burada hesaplanan fark değirmenin devir sayısına bölünür ve devir başına öğütme miktarı (Gbp) bulunur. İlk 100 devirlik öğütme işleminin ardından yapılan eleme işlemi sonucunda elek üstünde kalan malzeme oranı elek altına geçen malzeme oranına oranlandığında değirmene geri dönüş yükü oranı (GDYO %) hesaplanır. Bond bu deney için bu oranın % 250 olması gerektiğini kendi deney çalışmaları ve endüstrideki tecrübelerine dayanarak göstermiştir. Bunun anlamı şudur; Öğütülmüş malzemenin % 71,4'ü elek üstünde, % 28,6'sı elek altında toplanırsa bu orana ulaşılmaktadır ($((71,4/28,6)*100)) = \% 250$). İlk 100 devirlik dönüşte bu oranların yakalanması genellikle söz konusu olmaz. Deneyin ikinci aşamasında, kontrol eleği altına geçen malzeme torbalanarak ayrılır ve aynı miktarda boyut analizi önceden belirli olan besleme malından numune alınarak birinci aşamada öğütmeden sonra elek üstünde kalan malzeme ile birleştirilir. Böylece değirmene aynı miktar malzeme beslenir ve deneyin ikinci öğütme aşamasına geçilir. İkinci aşamada tecrübelerine göre farklı da olsa tekrar 100 devirlik bir çevrim sonucu öğütme işlemi tamamlanır. Her aşama sonunda besleme malından elek altına geçen miktar kadar taze besleme yapılır ve % GDYO oranı ölçülür. GDYO oranı % 250 ye ulaştığında deney iki aşamada daha aynı % 250 GDYO oranına ulaşılacak şekilde tekrarlanır. Bu işlem genelde 7. - 8. ya da 10. aşamaya kadar tekrar edilir. Son üç öğütme aşamasında elek altına geçen malzeme birbirine karıştırılır ve en büyüğü kontrol eleğinin $\sqrt{2}$ oranında altında olacak şekilde uygun bir elek serisinden geçirilir. Burada kontrol eleği altına geçen malzemenin % 80'inin geçtiği boyut (X_{p80}) belirlenir. Bu son üç aşamada elde edilen Gbp değerlerinin aritmetik ortalaması alınır ve Eşitlik 7.1'de belirtilen denklemde yerine konularak deneye bağlı iş indeksi ($W_{i \text{ deney}}$) o malzeme için bulunur.

$$Wi_{deney} = \frac{1,10 * 44,5}{P_i^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left[\frac{10}{\sqrt{X_{p80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{f80}}} \right]} \quad (7.1)$$

Bu formülde;

P_i (μm) : Kontrol elek açıklığı (bu tez çalışmasında 106 μm olarak kabul edilmiştir).

G_{bp} (gr) : Deneydeki son üç öğütme aşamasında kaydedilen devir başına kontrol eleği altına geçen malzeme miktarlarının ortalaması.

X_{p80} : Son üç öğütme aşamasında elek altına geçen malzemenin bir başka deyişle ürünün % 80'inin geçtiği tane boyutu.

X_{f80} : Besleme malının % 80'inin geçtiği tane boyutu (bu boyut yaklaşık 2000 μm 'dur.)

Bu tez çalışmasında taban külünün iş indeksi değeri hesaplanmıştır. Buna göre Eren Enerji termik santralinden alınan numuneden yaklaşık 8 kg'lık kısım 3,35 mm boyutu altına kırılmış ve bu kısımdan da 525 gr'lık bir numune alınarak elek analizine tabi tutulmuştur. Bu deney için 106 μm (P_i) açıklıklı bir elek kontrol eleği olarak seçilmiştir. Kırılmış besleme numunesinin bu boyutun altındaki % miktarı ise %14,47 olarak ölçülmüştür. Bu oran, tüm numuneler temsili olarak alındığı için deneyde öğütülecek numune için de değişmeyecektir.

P_i (μm): değeri kontrol elek açıklığı (106 μm).

G_{bp} (gr): 1,16 olarak hesaplanmıştır.

X_{p80} : 96 μm

X_{f80} : 2190 μm

Bu değerler taban külü için Eşitlik 2.26' daki formülde yerine konulursa Bond iş indeksi 18,34 kWh/t olarak bulunmuştur. Şekil 7.3' de Standart Bond değirmenine ait görüntü yer almaktadır.



Şekil 7.3 Standart Bond değirmeni.

7.3.2 Tane Boyutu Analizleri

Tane boyutu analizlerinde özellikle KD’de öğütme öncesi işlemlerde $\sqrt{2}$ serisi ASTM standart elekleri kullanılmıştır. KD’de öğütme işlemlerinden sonra tane boyutları çok inceldiğinden çok daha hassas ölçüm yapabilmek için Malvern Mastersizer S2000 lazer boyut analizi cihazı kullanılmıştır.

Lazer ışını kırınımı ölçümü esasıyla çalışan Malvern boyut analizi cihazı helyum-neon lazer ışın kaynağından yararlanır. Bu yöntemin tam adı “düşük açılı lazer ışık saçınımı (low angle laser light scattering – LALLS)’ dır. Bu yöntem, 0,1-2000 μm boyutları arasındaki malzemelerin boyut dağılımlarının belirlenmesinde birçok endüstri dalında kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 7.4’de Malvern Masterseizer S2000 tane boyut ölçüm cihazına ait bir görüntü gösterilmiştir.



Şekil 7.4 Malvern Masterseizer S2000 tane boyutu ölçüm cihazı.

7.3.3 Yoğunluk Analizleri

Yoğunluk analizi yöntemlerinde hava sıkıştırmalı piknometre ve 250 ml'lik balon joje kullanılmıştır.

7.3.3.1 Hava Sıkıştırmalı Piknometre ile Yoğunluk Analizinin Yapılması

Hava sıkıştırmalı piknometre, iki eşit hacimli silindirik hücre ve bu hücreler içinde hareket eden birer pistondan oluşmaktadır. İki hücre arasında bir bağlantı valfi ve bu valf devresine bağlı boşaltma valfi bulunmaktadır. İçine numune konan hücre ölçüm kolu ve ölçüm pistonuna bağlı iken cihaz içindeki hücre referans kolu ve referans pistonuna bağlıdır. Ölçüm prensibi bu iki hücre içindeki havayı dengeli bir şekilde basınç altında sıkıştırma işlemine dayalıdır. İki hücredeki sıkışma miktarının eşit olabilmesi için ölçüm yapmadan önce sıfırlama işleminin yapılması gereklidir.

Sıfırlama işlemi başlangıcında her iki valfte açıktır. Önce boşaltma valfi kapatılır ve her iki hücre kolları saat yönü tersinde sonuna kadar çevrilerek pistonlar tamamen geri çekilir. Daha sonra ölçüm kolu yardımıyla bu cihaz göstergesindeki sayaç, referans hücresi hacmi ile bağlantılı olan 106,4 (başlangıç değeri) değerine kadar saat yönünde çevirme işlemi yapılarak düşürülür. Ölçüm hücresi, cihazdaki yuvasına boş ve temiz olarak yerleştirilir ve mandalı sıkıca kapatılır. Bundan sonra 15 sn'lik bir bekleme süresi sonunda iki hücrenin basıncı eşitlenmiş olur sürenin ardından hücreler arasındaki bağlantı valfi kapatılır. Ölçüm ve referans kolu saat yönünde aynı hızda dengeli bir şekilde çevrilerek pistonlar ile hücrelerdeki havalar sıkıştırılır. Referans koluna bağlı piston içindeki durdurucu mekanizma bu referans kolunu durdurunca, birlikte çevirme işlemi durdurulur ve 15 s beklenir. Ölçüm kolu ile basınç ibresi sıfır çizgisine getirilmelidir eğer sayaç 000.0 değerini gösteriyorsa ibre zaten sıfır çizgisinde olacağından bu işleme gerek yoktur.

Eğer bağlantı valfi açıldığında basınç her iki hücrede de eşitse, basınç ibresi sıfır çizgisinden sapmaz. İki pistonda birlikte durduğunda hücreler içinde aynı seviyede sıkıştırma yapmış olup aynı seviyede dururlar. Numune yokken hücreler içindeki basınç eşittir. Aynı işlemler numune hücresine 0,1 gr hassasiyetle belli bir numune konularak ölçüm yapılır. Numune hücresi içinde malzeme varken pistonlar tekrar aynı seviyede dururlar ancak içlerindeki basınç aynı olmaz. Basınç ibresi de bu durumda sapacaktır. Bu basıncın aynı seviyeye getirilmesi için numunenin

konulduğu hücrenin basıncının azaltılması gerekir buda ölçüm pistonunun geri çekilmesi ile mümkündür. Bu yüzden basınç ibresininin tekrar dengeye gelinceye kadar ölçüm kolu ile hücre pistonu geri çekilmelidir. Bu durumda sayaçta okunan değer tekrar 000,0 değerini gösterirken pistonun geri çekilmesi sonucu sayaçta numunenin gerçek hacmi değeri okunur. Numunenin ağırlığı gerçek hacmine oranlandığında gerçek yoğunluğu bulunur. Şekil 5.5’de hava sıkıştırırmalı piknometrenin genel olarak resmi ve basınç ibresi ile hacim sayacı gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Hava sıkıştırırmalı piknometre.

7.3.3.2 Balon Joje ile Yoğunluk Tayini

Bu işlemde 250 ml’lik bir balon joje kullanılmıştır. Balon joje tartılmış ve boş ağırlığı (M_j) kaydedilmiştir. Daha sonra, 50-60 gr (M_n) kadarlık malzeme numunesi tartılmıştır. Balon jojenin 250 ml’lik çizgisine kadar saf su doldurulmuştur ve bir süre çalkalanıp beklendikten sonra tartılmış ve joje ve suyun toplam ağırlığı ($M_j + MS_1$) hesaplanmıştır. Bu işlemin ardından bu iki tartımın farkı ile kap içerisindeki ilk su ağırlığı (MS_1) bulunur. Daha sonra su boşaltılır ve joje belli bir süre etüvde kurutulduktan sonra önceden tartılmış numune joje içerisine konur ve tartılarak ($M_j + M_n$) ağırlığı ölçülür. saf su jojenin 250 ml çizgisine kadar tekrar doldurulur ve son bir tartım ile jojenin numune ve saf su ile birlikte toplam ağırlığı ($M_j + M_n + MS_2$) ölçülür. Bu değerden ($M_j + M_n$) ağırlığı çıkarıldığında joje içine konulan saf suyun ikinci ağırlığı (MS_2) bulunur. Saf suyun 1. ve 2. ağırlıkları arasındaki fark numunenin gerçek boşluksuz hacmine eşittir. Bu çalışmaların yapılması sırasında hem suyun hem de numune içindeki havanın boşaltılması için yeterli süre sarsma (en az 5 dk) ve bekleme (en az 10 dk) yapılmalıdır. Bu ölçümler yeterli sarsma ve bekleme sürelerinde yapıldığında havalı piknometre ile de yapılan

paralel ölçümlere çok yakın değerler elde edilmiştir. Numunenin hakiki yoğunluğunun hesaplanması Eşitlik 7.2’de verilmiştir.

$$\rho = \frac{Mk}{MS_1 - MS_2} \quad (7.2)$$

Mk: Numune ağırlığı (gr)

MS₁: 250 ml seviyesindeki suyun ağırlığı, gr(ml).

MS₂: 250 ml seviyesindeki su + numune süspansiyonu içindeki suyun ağırlığı, gr(ml).

7.3.4 Özgül Yüzey Alanının Ölçülmesi

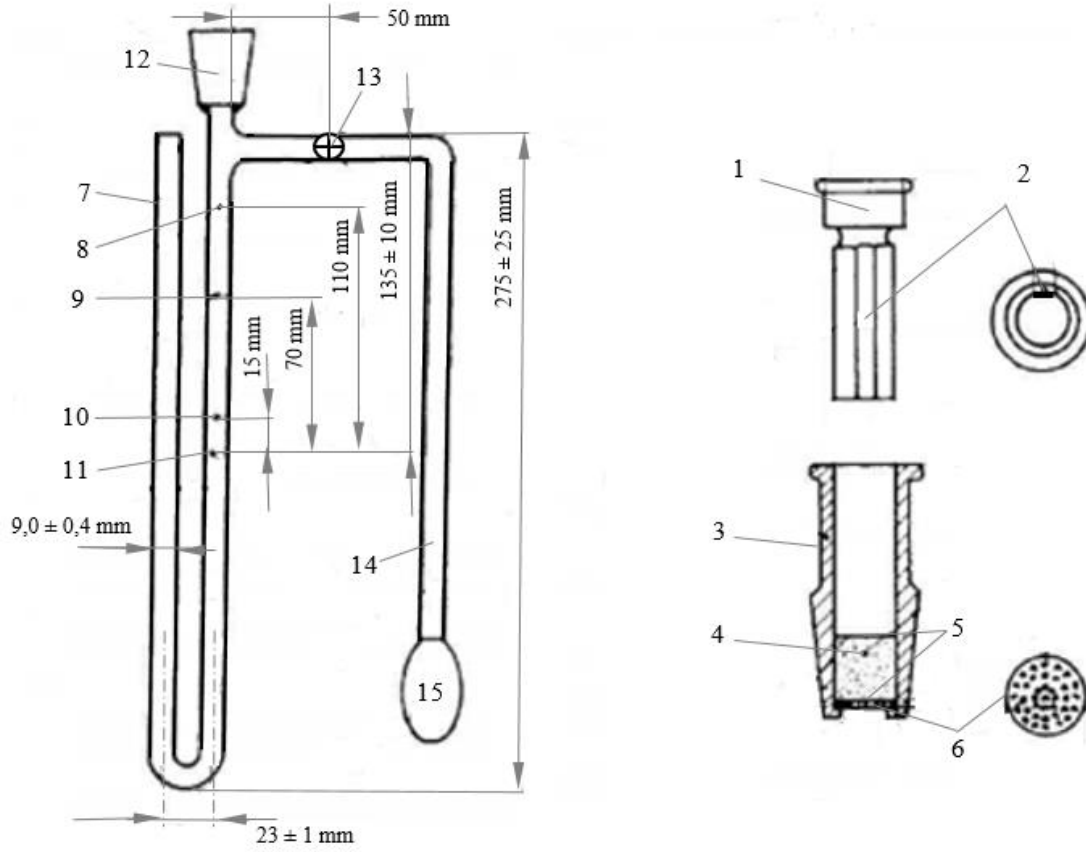
Bu tez çalışmasında KD’de öğütülmüş ürünlerin özgül yüzey alanlarının tayini için Blaine yüzey alanı manometresi kullanılmıştır. Blaine değeri, bir malzemenin birim miktarındaki toplam yüzey alanının bir ifadesidir. Blaine deneyi, sıkıştırılmış bir çimento yatağı veya yüzey alanı hesap edilecek bir malzeme yatağından sabit hava miktarının geçtiği sürenin gözlenmesiyle özgül yüzeyinin tayin edilmesi esasına dayanır.

Ölçüm aleti temel parçaları; Hücre kabı (hava geçirmek için), Hücre kabının tabanına yerleştirilen bir delikli disk (30-40 adet 1 mm çaplı delikten oluşur), Hücrenin içine serbestçe girebilecek uygun boyutlu bir piston (numune sıkılama için), hücrenin, içine yerleştirilebileceği bir ağıza sahip manometre, monometre sıvısı, manometre sıvısının belli bir başlangıç seviyesine getirilmesi için gerekli par.

Deneydeki yardımcı cihazlar olarak; hava sıkıştırmalı piknometre, % 1 hassasiyetli kronometre, hassas terazi (numune ve civa ağırlığını tartmak için sırasıya 1 mg ve 10 mg yaklaşımı), Numune küreği, düzeltme çubuğu, hücre üzerine yerleştirilen hava geçirmez mantardan yapılmış tıpa, huni, filtre kağıdı, termometre, cam plaka kullanılmaktadır.

Deneyde kullanılan yardımcı malzemeler;

Civa (reaktif ya da iyi kapasitede), referans çimento (özgül yüzeyi bilinen standart çimento), ince yağ (tabaka oluşturmayacak incelikte), ince gres (vazelin de olabilir). Şekil 7.6’da Blaine yüzey manometresinin şekli verilmiştir.



Şekil 7.6 Blaine yüzey alanı manometresi'nin şematik görünümü.

1. Piston
2. Hava çıkışı için düz yüzey
3. Hücre
4. Sıkıştırılmış çimento yatağı
5. Filtre kağıdı
6. Delikli disk
7. Manometre
8. En üst çizgi
9. Kronometrenin başladığı çizgi
10. Kronometrenin durdurulduğu çizgi
11. En alt çizgi
12. Hücrenin konik yuvası
13. Musluk
14. Lastik boru
15. Puar

Bir malzemenin özgül yüzey alanı ölçülecekse, deneyde önceden bu malzemenin ne kadar miktar kullanılacağını bilmesi gerekir. Bunun için önceden yapılan yoğunluk tayini ile hakiki yoğunluğunun ve hücre içindeki sıkılama hacminin belirlenmesi gerekir.

Sıkılama hacmi belirlenirken aynı zamanda Blaine manometresinin kalibrasyon sabiti de yapılır. Bunun için, özgül yüzey alanı (S) bilinen çimento (bu çalışmada Portland çimentosu, PÇ CEM I 42.5R) için 3665,04 cm²/gr), sabit miktarda (2,8 gr) standart bir çimento numunesi, civa ve filtre kağıdı kullanılır. Hücre içinde standart çimento yokken hücre tabanındaki delikli disk üzerine 2 adet filtre kağıdı ve üzerine alacağı kadar civa cam plaka ile düzleştirilerek konulur. Bu civanın ağırlığı (M₁) darası alınmış bir kaptan ölçülür. Aynı işlem bu kez tek filtre kağıdı ile hücre içine sıkılanarak yerleştirilmiş standart çimento ve onun üzerine bir adet filtre konulduktan sonra civanın tamamen doldurulması şeklinde yapılır. Buradan da civanın ikinci durumdaki ağırlığı (M₂) ölçülür. Böylece kullandığımız hücre için sıkılama hacmi Eşitlik 5.2'den belirlenebilir. Civanın yoğunluğu eşitlikte kullanılırken deney ortamının sıcaklığı dikkate alınır. Bunun için çizelge 7.3'den yararlanılabilir.

$$V_s = \frac{M_1 - M_2}{\rho_{Civa}} \quad (7.3)$$

Sıkılama hacmi belirlendikten sonra, önceden hakiki yoğunluğu (ρ) bilinen numunenin deneyde kullanılacağı miktar (Mn) Eşitlik 7.4'den belirlenebilir. Bu deneyde gözeneklilik oranı (e) 0,5 olarak kabul edilmektedir. Sıkılama hacmini belirlemek için bu işlem 2,8 gr'lık referans numunesi ile tekrar edilir ve iki sıkılama hacmi arasında farkın (0,01 cm³)'den az olması gerekmektedir.

$$Mn = \rho V_s (1 - e) \quad (7.4)$$

Kalibrasyon işlemindeki deneysel işlemler, miktarı belirlenen numune için aynen tekrar edilir. Buna göre numune hücre kabına yerleştirildikten sonra sıkılama işlemi yapılır ve hücre kabı manometre yuvasına yerleştirilir. Hücre kabı üzerine hava geçişini engellemek için tıpa yerleştirilir. Manometre musluğu açılır ve puar yardımıyla manometre sıvısı manometre üzerindeki en üst çizgiye çekilir, musluk kapatılır, musluk kapatıldığında sıvı seviyesinin düşmemesi gereklidir, eğer düşerse sistemdeki hava kaçakları giderilmelidir. Sıvı seviyesi sabitlendikten sonra tıpa çıkarılır ve sıvı seviyesinin aşağıya inişi gözlenir. Sıvı seviyesi 40 mm

indikten sonra ikinci sıvı çizgisine gelir ve kronometre çalıştırılır. Seviye bu çizgiden 55 mm aşağıya inip alt çizgiye geldiğinde kronometre durdurulur ve süre kaydedilir. Bu işlem aynı standart çimento yatağı için tekrar edilir ve sıcaklık ile zaman ölçümü hassas bir şekilde kaydedilir. Aynı işlem standart çimentonun farklı iki numunesi için tekrar edilir ve bu değerlerin ortalaması alınır. Eşitlik 7.5’de bu cihaz için kalibrasyon sabiti (K) bulunur.

$$K = \frac{S\rho(1 - e)\sqrt{n}}{\sqrt{e^3}\sqrt{t}} \quad (7.5)$$

Bu eşitlikte;

K : Deney düzeneğinin kalibrasyon sabiti

S : Referans numunenin Blaine özgül yüzey alanı (cm²/gr)

ρ = referans numunesinin hakiki yoğunluğu (gr/cm³)

e = gözeneklilik (bu deney için 0,5 olarak kabul edildi)

n = Sıcaklığa göre havanın viskozitesi (Pa.s)

t = Ölçülen zaman (s)

Ortam sıcaklığına göre, civanın yoğunluğunu ve havanın visikositesini gösteren bir tablodan yararlanılır. Bu tablo Çizelge 7.4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4 Civa yoğunluğu ve hava visikositesinin sıcaklıkla ilişkisi.

Sıcaklık (t) (°C)	Civanın Yoğunluğu (ρ_{civa}) (gr/cm ³)	Havanın Viskozitesi (n) (Pa.s)
16	13,560	0,00001800
17	13,560	0,00001805
18	13,550	0,00001810
19	13,550	0,00001815
20	13,540	0,00001819
21	13,540	0,00001824
22	13,540	0,00001829
23	13,540	0,00001834
24	13,540	0,00001839

Daha sonra numunenin Blaine özgül yüzey alanı Eşitlik 7.6’dan hesaplanır.

$$S_n = \frac{K\sqrt{t}}{\sqrt{\rho}\sqrt{n}} \quad (7.6)$$

Bu eşitlikte;

S_n : Numunenin Blaine Yüzey Alanı değeri (cm^2/gr)

K : Deney düzeneğinin kalibrasyon sabiti

T : Manometre sıvısının inme süresi (s)

ρ : Numunenin hakiki yoğunluğu (gr/cm^3)

n : Havanın ortam sıcaklığındaki viskozitesi (Pa.s) (MEB 2012)

7.4 TABAN KÜLÜNÜN KARIŞTIRMALI DEĞİRMENDE ÖĞÜTÜLMESİ

Deney sayısına göre tasnif edilmiş örnekler, farklı öğütme sürelerinde ve karıştırma hızlarında laboratuvar ölçekli karıştırmalı bilyeli değirmende öğütülmüştür. Bu değirmen, dikey pinli bir karıştırma mekanizmasına sahiptir. Bu tez çalışmasında kullanılan karıştırmalı bilyeli değirmene ait bir görüntü Şekil 7.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.7 Laboratuvar ölçekli dikey karıştırmalı değirmen resmi.

Laboratuarda bulunan karıştırılmalı bilyeli değirmende kuru yöntemle sırasıyla öğütme süresi (dk), ve karıştırma hızını (d/dk) incelemek üzere kesikli öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, önceden deneyde kullanılacak değirmen boyutları belirlenmiş ve değişkenlerin incelenmesi için yapılacak deney sayısı ve gerekli deneysel yaklaşım oluşturulmuştur. Bu deneylerde 206x130 mm (yükseklikxçap) boyutlarında, 2,2 kW motor gücünde ve karıştırıcı şaftı 16 adet pinden oluşan dikey yönde karıştırma işlemini gerçekleştiren bir karıştırılmalı değirmen kullanılmıştır. Değirmen gövdesinin hacmi 2710 cm³ olup, bunun çalışma anında karıştırıcı şaftı ve pinleri hesaba katılmadan kullandığı etkin hacmi (V_d) 2557 cm³'tür. Bundan sonra hesaplamalarda bu etkin hacim kullanılacaktır.

Öğütme deneylerinde bilya doluluk oranı % 40 olup, sabit tutulmuştur. Değirmene beslenen taban külünün maksimum tane boyutu 0,5 mm'dir. Öğütücü ortam olarak, 2,5 mm çaplı 7,6 g/cm³ özgül ağırlıklı (d_b) çelik bilyeler kullanılmıştır. Değirmen boyutları ve sabit parametreler, daha önceden yapılmış çalışmalar ve ön deneylerde elde edilen tecrübeler ile belirlenmiştir.

Değirmen etkin hacmi dikkate alınarak belirlenen parametrelere göre her bir öğütme deneyinde kullanılan bilye yığın hacmi (V_{by}) 1014 cm³ dür. Bu yığın hacmi, bilyeler arası boşluklu hacmidir. KD'lerde öğütme ile ilgili çalışmalarda bilyeler arası boşluk oranı (e) bilye boyutundan bağımsız olarak genel olarak % 40 olarak kabul edilmektedir. Buna göre Eşitlik 7.7, 7.8 ve 7.9'dan yararlanarak kullanılacak toplam bilye ağırlığı (M_b) 4663 gr olarak hesaplanır.

$$V_{by} = V_d * J, \text{ (bilyelerin boşluklarıyla birlikte hacmi)} \quad (7.7)$$

$$V_{bg} = V_{by} * (1 - e), \text{ (gerçek bilye hacmi)} \quad (7.8)$$

$$M_b = V_{bg} * d_b = V_{by} * (1 - e) * d_b = 4663 \text{ gr} \quad (7.9)$$

Bilyeler arası boşluk hacmi (V_f) Eşitlik 7.10'dan bulunabilir.

$$V_f = V_{by} * (e) = 1014 * 0,4 = 406 \text{ cm}^3 \text{ d\u00fcr.} \quad (7.10)$$

- 0,5 mm boyutuna k\u0131r\u0131lan taban k\u00fcl\u00fc malzemesinin y\u0131\u0131n yo\u011funlu\u011fu (d_{my}) 1,16 gr/cm³ olarak \u00f6l\u00e7\u00fclm\u00fc\u015ft\u00fcr. Bilyalar arası bo\u015flu\u011fun tamamının ($f = \% 100$) doldurulması ile yapılan \u00f6\u011f\u00fctme deneylerinde \u00f6\u011f\u00fct\u00fclecek malzeme miktar\u0131 (M_m) a\u015fa\u011f\u0131da belirtilen E\u015fitlik 7.11'den hesaplanabilir.

$$M_m = V_f * d_{my} * f = 470,4 \text{ gr.} \quad (7.11)$$

\u00d6\u011f\u00fctme i\u015lemi sonunda elde edilen her bir \u00fcr\u00fcnden temsili olarak yakla\u015f\u0131k 15 gr'lık bir \u00f6n numune alınm\u0131\u015ft\u0131r. Bu \u00f6n numunelerden de yakla\u015f\u0131k 1,5 gr'lık bir temsili k\u0131s\u0131m Malvern Masterseizer S2000 tane boyut \u00f6l\u00e7\u00fcm cihaz\u0131nda boyut analizinde kullan\u0131lm\u0131\u015ft\u0131r. \u00d6zellikle \u00e7imento sekt\u00f6r\u00fcnde malzemelerin hacimsel olarak % 90'ının daha ince oldu\u011fu tane boyutunu ifade eden d_{90} boyutu esas alınm\u0131\u015ft\u0131r. Bu cihazdan alınan sonu\u00e7lar \u00e7ok ince tane boyutları i\u00e7in bile birikimli miktarları g\u00f6stermektedir. B\u00f6ylece, \u00f6\u011f\u00fct\u00fclm\u00fc\u015f malzemelerin boyut da\u011f\u0131lımlarını malzemenin farklı birikimli miktarlara g\u00f6re (% 50 ve % 10) tane boyutları da (d_{50} ve d_{10}) cihazdan okunmu\u015f ve de\u011ferlendirmelerde kullan\u0131lm\u0131\u015ft\u0131r. Bu durumda boyut da\u011f\u0131lım\u0131 daha geni\u015f bir spektrumdan incelenebilir.

\u00d6\u011f\u00fctme \u00fcr\u00fcnlerinin isimlendirilmesinde anlam kolaylığı i\u00e7in \u00f6\u011f\u00fctme \u00fcr\u00fcn\u00fc taban k\u00fcl\u00fc TK kısaltması, \u00f6ncesine kar\u0131\u015ftırma hızı, sonrasına \u00f6\u011f\u00fctme s\u00fcresi eklenerek isimlendirme yapılacaktır, (\u00d6rnek: 900 d/dk kar\u0131\u015ftırma hızı 10 dk \u00f6\u011f\u00fctme s\u00fcresi sonunda elde edilen taban k\u00fcl\u00fc \u00fcr\u00fcn\u00fc i\u00e7in 900TK10 kodlaması kullanılacaktır vb.).

Kar\u0131\u015ftırmalı de\u011ferirmende yapılan \u00f6\u011f\u00fctme deneyleri farklı kar\u0131\u015ftırma hızlarındaki sayılarına g\u00f6re a\u015fa\u011f\u0131da belirtilmi\u015ftir;

- Kar\u0131\u015ftırma hızı olarak 300 ve 600 d/dk' da 6 farklı \u00f6\u011f\u00fctme s\u00fcresinde (1-2,5-5, 10, 15 ve 20 dk) toplam 12 adet,
- 900 d/dk kar\u0131\u015ftırma hızında 7 farklı \u00f6\u011f\u00fctme s\u00fcresinde (1, 2,5, 5, 7,5, 10, 15 ve 20 dk) 7 adet,

- 1200 ve 1500 d/dk'da 6 farklı öğütme süresinde (0,5, 0,75, 1, 2,5, 5 ve 10 dk) olmak üzere toplam 12 adet olmak üzere, tüm çalışmada toplam 31 adet öğütme deneyi yapılmıştır.

KD'de art arda gelen farklı deney grupları tasarlanmış ve bu deney gruplarında elde edilen sonuçlara göre bir sonraki kademedeki deneylerin değişkenleri saptanmış ve işlemler devam etmiştir. Bu çalışmada taban külünün KD'de öğütülmesi üç kademedeki incelenmiştir.

7.4.1 Öğütme Süresinin Ürün Boyutuna Etkisinin İncelenmesi

KD'de ilk olarak sabit bir karıştırma hızı olarak 900 d/dk seçilmiş ve 7 farklı öğütme süresi sonunda değirmenin durdurulması ve içerisindeki malzemenin öğütücü boncuk ortamından ayrılması ile kesikli olarak öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulanan öğütme süreleri sırasıyla 1, 2,5, 5, 7,5, 10, 15 ve 20 dk'dır.

7.4.2 Öğütmede Karıştırma Hızının Ürün Boyutuna Etkisinin İncelenmesi

Farklı karıştırma hızlarının öğütmeye etkisinin incelenmesi amacıyla 300, 600, 1200 ve 1500 d/dk karıştırma hızlarında ve 4 farklı öğütme süresinde (5, 10, 15 ve 20 dk) öğütme deneyleri tasarlanmıştır. Pratikte, 1200 ve 1500 d/dk karıştırma hızlarında 15 ve 20 dk'lık öğütme deneylerinde karşılaşılan bazı aşırı ısınma ve yüksek akım gibi sorunlar nedeniyle bu deneyler herhangi bir olumsuz durum oluşmaması için yapılmamış ve bu grup öğütme deneylerinde karıştırma hızları için sadece 5 ve 10 dk öğütme süresinde elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

7.4.3 Taban Külünün Düşük Öğütme Sürelerinde Öğütülmesi

Sırasıyla, öğütme süreleri ve karıştırma hızlarının incelendiği ilk iki grup öğütme deneylerinin ürünlerinin tane boyutu ve tüketilen özgül enerji açısından değerlendirilmesi sonuçlarının oluşturduğu yönlendirmeye göre, işlemin ekonomikliğinin daha iyi karşılaştırılabilmesi için 5 dk'dan daha kısa öğütme sürelerinde deneyler tasarlanmıştır. Bu grup deneylerde kendi içlerinde yüksek ve düşük hızlarda karıştırmanın yapıldığı deneyler olarak ayrı alt gruplarda incelenmiştir.

7.4.4 Karıştırma Değirmende Özgöl Enerjinin (ÖE) Hesaplanması

Bu çalışmada, karıştırma değirmende yapılan öğütme testlerinde özgöl enerjinin ölçümü üç fazlı sayaç ve inverter bağlantısı ile yapılmıştır. Şekil 7.8’ de karıştırma değirmende kullanılan sayaç ve inverter bağlantısı cihazı gösterilmiştir.



Şekil 7.8 Üç fazlı sayaç ve inverter.

Değirmen boş olarak ve istenilen karıştırma hızında çalıştırılır. Çalışma sırasında otomatik bir elektrik sayacından Ws (Watt-saat) cinsinden okunan enerji değerlerinin değişim (ΔE_b) zamanları bir kronometre yardımı ile zaman aralıkları (Δt) ile birlikte saniye (sn) cinsinden kaydedilir. Öğütme süresinin uzunluğuna da bağlı olarak istenilen sayı ve aralıklarda enerji ve zaman ölçümü yapılabilir. Böylece dolu veya boş çalışma şartlarında değişen öğütmenin herhangi bir anında değirmenin çektiği enerji (güç) belirlenebilir. Değirmen boş çalışırken bu değerlerin çok az değiştiği görülmüştür.

Burada, toplam enerji değişiminin ($\Sigma \Delta E$) toplam zaman aralıklarına ($\Sigma \Delta t$) oranı, o karıştırma hızı için değirmenin boş çalışırken çektiği güç (P_b) olarak kabul edilmiş ve bu şekilde hesaplanmıştır. Burada bulunan güç değerleri ilgili birim çevirme kuralları kullanılarak kW cinsinden hesaplanır. Eşitlik 7.12’de bu hesaplama gösterilmektedir.

$$\frac{\Sigma \Delta E_b}{\Sigma \Delta t} = P_b, \text{ kW} \quad (7.12)$$

Tüm bu işlemler değirmen istenilen doluluk oranlarında çalıştırılırken tekrarlanmış ve değirmen dolu iken gerekli güç (P_d) hesaplanmıştır. Ancak, dolu çalışırken özellikle 1500 d/dk gibi yüksek hızlarda özellikle öğütme süresi uzarken değirmenin çektiği güç orantısız bir biçimde artmaktadır. Bu durum, özellikle karıştırma hızı-özellik enerji grafiklerinde belirgin bir şekilde görülmektedir ve ilgili bölümde irdelenmiştir.

P_d değeri ile P_b değeri arasındaki fark, o şartlarda öğütme işleminde kullanılan net güç (ΔP) olarak ifade edilir. Net gücün toplam öğütme süresi (t) ile çarpılıp değirmen içerisindeki malzeme miktarına (W , gr) oranı ile de öğütme işleminde kullanılan özgül enerji kWh/ton cinsinden hesaplanır. Bu hesaplama Eşitlik 7.13'de gösterilmiştir.

$$\frac{\Delta P \cdot t}{W} = \text{Özgül Enerji}(\text{ÖE}), \frac{kWh}{t} \quad (7.13)$$

7.5 PUZOLANİK AKTİVİTE İNDEKSİNİN BELİRLENMESİ

Öğütülmüş taban külü örneklerinin çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması için puzolanik aktivite indekslerinin (% PAI) belirlenmesi gereklidir. TS EN 197-1 standartlarına göre üretilen kontrol beton örnekleri için bağlayıcı kısım olarak sadece Portland çimentosu (PÇ) kullanılırken, PÇ yerine % 25 oranında taban külü (TK), uçucu kül (UK) ve silis kumu (SK) ikame edilerek diğer beton örnekleri hazırlanmıştır. Beton örnekleri 7 ve 28 günlük kür sürelerinin ardından tek eksenli basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca, uzun süreli kür işlemlerinin etkisini karşılaştırmak için UK, ince öğütülmüş TK ve PÇ'sunun (kontrol betonu) 1 yıllık puzolanik aktivite testleri de gerçekleştirilmiştir. Puzolanik aktivite testlerinin yapılması için ilk olarak TS EN 197-1 standartlarına göre kontrol beton örneği harç karışımının hazırlanması gereklidir.

Deney sonuçları değerlendirildikten sonra, benzer tane boyutu özelliklerine sahip öğütme ürünlerinin tekrardan % PAI deneyleri yapılmamıştır.

Buna göre; karıştırma hızları için, tüm öğütme ürünleri (31 adet öğütme deneyi ürünü) içinde 22 adet öğütme ürününün PAI deneyleri aşağıda gösterilmiştir.

- 300 d/dk karıştırma hızı ve 1-2,5-5 dk öğütme süresinde 300TK1, 300TK2,5 ve 300TK5 kodlu ürünlerin,
- 600 d/dk karıştırma hızı ve 1-2,5-5 dk öğütme süresinde 600TK1, 600TK2,5 ve 600TK5 kodlu ürünlerin,
- 900 d/dk karıştırma hızı ve 1-2,5-5 dk öğütme süresinde 900TK1, 900TK2,5, 900TK5, 900TK7,5, 900TK15 ve 900TK20 kodlu ürünlerin,
- 1200 d/dk karıştırma hızı ve 1-2,5-5 dk öğütme süresinde 1200TK0,5, 1200TK0,75, 1200TK1, 1200TK2,5 ve 1200TK5 kodlu öğütme ürünlerin,
- 1500 d/dk karıştırma hızı ve 1-2,5-5 dk öğütme süresinde 1500TK0,5, 1500TK0,75, 1500TK1, 1500TK2,5 ve 1500TK5 kodlu ürünlerin PAI deneyleri yapılmıştır.

7.5.1 Beton Harçlarının Hazırlanması

Çimento ile beton üretiminde üç temel girdi malzemesi vardır ve bunların temel birleşim oranları aşağıda belirtilmiştir. Bunlar;

- Çimento : Bağlayıcı madde olarak (1 kısım).
- Agrega (İnce agrega + İri agrega) : Dolgu malzemesi olarak : (3 kısım).
- Su (Hidratasyon reaksiyonu için) : (0,5 kısım).

Tamamen PÇ kullanılarak hazırlanan kontrol beton örneğinin harç bileşimi Çizelge 7.5’de belirtilmiştir.

Çizelge 7.5 Kontrol beton harcı genel bileşimi ve oranları.

Beton Harç Bileşenleri	Miktar	Miktar
Su (Saf su)	0,5 Kısım	225,0 ml. (g.)
Çimento (Bağlayıcı)	1 Kısım	450,0 gr.
Agrega (Dolgu)	3 Kısım	1350,0 gr.

Daha sonra, PAI değerinin ölçülmesi istenen malzeme, harç karışımındaki bağlayıcı kısım içerisine ilgili standarda göre % 25 oranında ikame edilerek kontrol betonu harçları hazırlanır. Puzolanik malzeme (Puzolan) olarak bu çalışmada çeşitli sürelerde öğütülmüş TK UK ve SK örnekleri kullanılmıştır. Çizelge 7.6’de test beton örneklerinin harç bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 7.6 Deneme beton harçlarının genel bileşimi ve oranları.

Beton Harç Bileşenleri	Miktar	Miktar
Su (Saf su)	0,5 Kısım	225,0 ml. (gr.)
PÇ (Bağlayıcı)	0,75 Kısım	337,5 gr.
Puzolan (Bağlayıcı)	0,25 Kısım	112,5 gr.
Agrega (Dolgu)	3 Kısım	1350,0 gr.

7.5.2 Harcın Karıştırılması

Karıştırma işleminde önce saf su, karıştırma kabına konur. Makine çalıştırılır ve ardından çimento veya taban külü ikameli çimento su üzerine ilave edilir. 30 sn sürelik karıştırmanın ardından karıştırma devam ederken, ikinci bir 30 sn karıştırma süresi içerisinde agrega olarak kullanılan standart rilem kumu karışıma ilave edilir. Böylece başlangıçtan itibaren 60 sn sonunda kumun (agrega) ilavesi tamamlanmış olur. Kum ilavesinin hemen ardından makine hızlı çalıştırma durumuna getirilir ve 30 sn daha çalıştırılır. Daha sonra, 90 sn süre ile makine durdurulur ve karışımın bir kaşık aparatı ile karıştırma kabının kenarlarına savrulmuş olan kısımları tekrar kabın ortasına toplanır. Tekrar 60 sn süre ile yüksek hızla karıştırmanın ardından kalıp dökme işlemlerine hazır hale gelir. Oluşturulan karışımlar, Şekil 7.9’da gösterilen harç makinesinde standartlarına göre karıştırılmıştır.



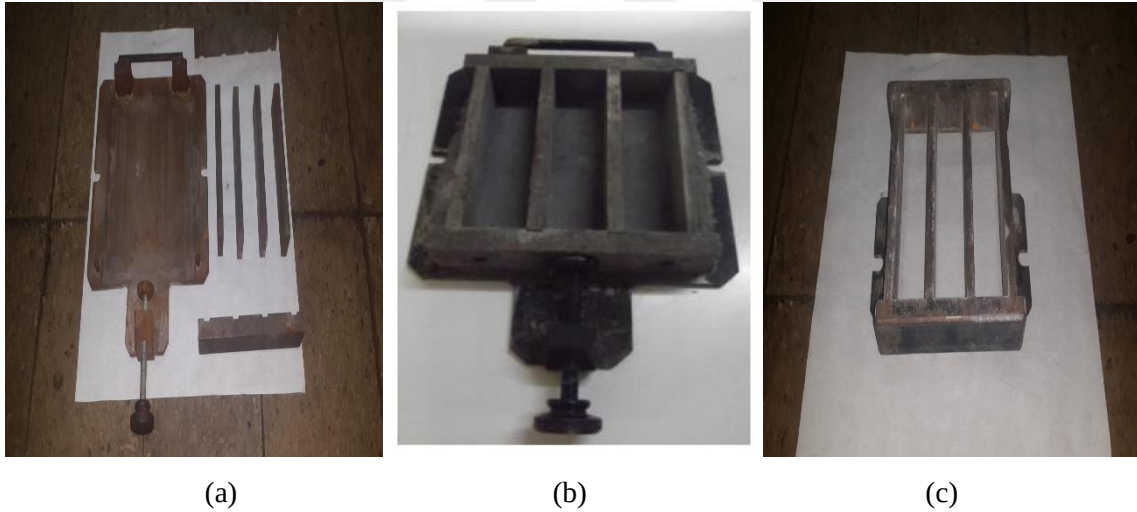
Şekil 7.9 Deneylerde kullanılan harç makinesi.

7.5.3 Harcın Standart Kalıplara Dökülmesi

Yaklaşık dört dakikalık karıştırma ve bekletme işleminin ardından hazırlanmış olan beton harçları, ilgili standartlarda belirtilen niteliklerdeki kalıplara dökülür. Bu kalıplar (16x4x4) cm³'lükür ve mangan çelik alaşımından imal edilmiştir, birbirine geçmeli parçalardan meydana gelir ve üç ayrı bölme oluşturacak şekilde monte edilir.

Kalıp çıkarma işlemleri, beton kalıbı cihazlarında yapılır. Harç hazırlama işlemlerinin ardından, beton harçları bu kalıpların üç bölmesine eşit olacak miktarda dökülür. ve standart beton kalıbının üç ayrı bölmesine eşit miktarda dağıtılacak şekilde yerleştirilir.

Hazırlanan her karışım için üç adet kalıp dökülmüştür. Şekil 7.10'da kalıpların parçaları monte edilmiş hali ve sarsma işlemlerinde kalıp üzerine yerleştirilen başlık ızgara gösterilmiştir.



Şekil 7.10 (a) Harç kalıbı parçaları, (b) Birleştirilmiş kalıp, (c) Kalıp başlığı.

Birleştirilmiş kalıp, kalıp sarsma cihazı üzerine yerleştirilir ve onun üzerine kalıp başlığı monte edilir. Şekil 7.11' de sarsma işleminde kullanılan cihaz gösterilmiştir.



Şekil 7.11 Kalıp sarsma cihazı.

7.5.4 Kalıplara Kür İşleminin Uygulanması

Harç kalıbı, bölmelerindeki harcın düzleştirilme işleminin ardından yaklaşık 15 dk sarsma cihazı üzerinde hareketsiz bekletildikten sonra cihaz üzerinden alınır ve (± 1) 20 °C sıcaklıkta minimum % 70 bağıl neme sahip bir bekletme odasına (kür odasına) alınır. Bu hava koşullarında, kalıp bölmelerindeki harca 24 saatlik bir havada kür (bekletme) işlemi uygulanır. Havada kür işleminin ardından kalıp sökülür ve üç adet sertleşmiş beton, çeşme suyu ile doldurulmuş şeffaf leğenlere altlarına sudan etkilenmeyecek, betonun dengede kolayca durabileceği kalınlıkta ikişer destek konarak yerleştirilirler. Su seviyesi beton örneklerinin su içindeki seviyesini en az 0,5 cm geçecek şekilde ayarlanır. Böylece sudaki kür işlemi başlar. Suda bekletme süresi normal betonlar için 28 gündür bunun nedeni PÇ ile hazırlanan beton örnekleri zamanla güç kazanır ve bu güç, nihai değerine 28 günde tam olarak olmasada % 99'a yakın bir oranda sahip olurken 7 günlük kür sonunda % 65'ine ulaşmaktadır. Bu nedenle 28 günlük kür süresi büyük bir doğruluk payı ile betonun gerçek dayanımını ölçmek için uygun bir süredir. Ancak çimentolarda erken ve geç dayanımlarda betonun kullanılacağı yere göre önemli olabilir. Farklı iklim koşulları veya betonun su altında kullanımına bağlı olarak bu testler 28 günden çok daha kısa veya çok daha uzun süreler içinde yapılabilir. Kısa süreler için literatürde en çok kullanılan süreler 2,7 ve 14 gün, uzun süreler için ise 60,90 ve 180 gün hatta 1,2 yıla kadar su altında kür işlemleri yapılır. Su altında kür işlemine bir örnek Şekil 7.12' de sunulmuştur.



Şekil 7.12 Beton örneklerinin (16x4x4 cm³ boyutlarında) su içerisinde bekletilmesi.

7.5.5 Beton Örneklerinin Tek Eksenli Basınç Dayanımlarının Ölçülmesi

Kür işlemi bittikten sonra örnekler sudan çıkarılır ve temiz bir havlu ile kurutulduktan sonra döner elmas bıçaklı kafa kesme makinesi ile ikiye bölünür. Bu işlem sonucunda, beton örnekleri standartlara uygun bir biçimde tek eksenli basınç dayanımının ölçüleceği yaklaşık 8*4*4 cm³ boyutlarına getirilir. Daha sonra tek eksenli basınç dayanımı cihazında, bu bölünmüş beton örnekleri, mangan çeliği alaşımından imal edilmiş 4*4*1 cm³ boyutlu kırma başlıklarının arasına ortalanacak şekilde yerleştirilir. Basınç cihazı bu kırma başlıkları arasındaki betona standartlara göre sn'de 3 kN artacak şekilde baskı yapar. Bu baskı sonucu beton örneği belli bir süre sonra kırılır. Kırıldığı anda basınç cihazı ibresinin durduğu kuvvet değeri (F) kN cinsinden kırıldığı kuvveti gösterir. Bu değer kırma başlıklarının bir tanesinin yüzey alanına (A= 40*40 = 1600 mm²) oranlandığında kN/mm² cinsinden kırılma basınç değeri elde edilir. Bu değer MPa (megapascal) birimine çevrilir. Eşitlik 7.14'de beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarını gösteren formül verilmiştir.

$$\frac{F}{A} = \text{Tek eksenli basınç dayanımı, MPa} \quad (7.14)$$

Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan beton kesme ve tek eksenli basınç dayanımı makinesinin görüntüleri Şekil 7.13' de verilmiştir.



(a)

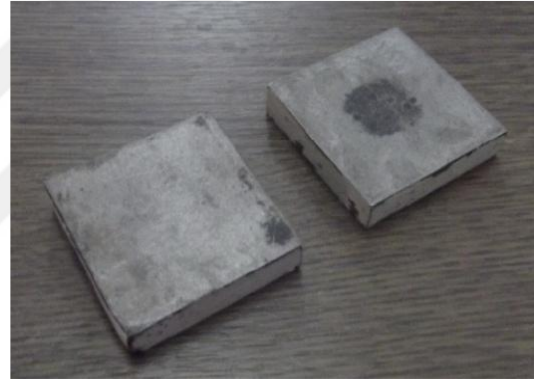
(b)

Şekil 7.13 (a) Beton kesme makinesi, (b) Tek eksenli basınç dayanımı makinesi.

Tek eksenli basınç dayanımı makinesinde beton örneğinin kırılması ve kırma başlıklarının resimleri Şekil 7.14’ de gösterilmiştir.



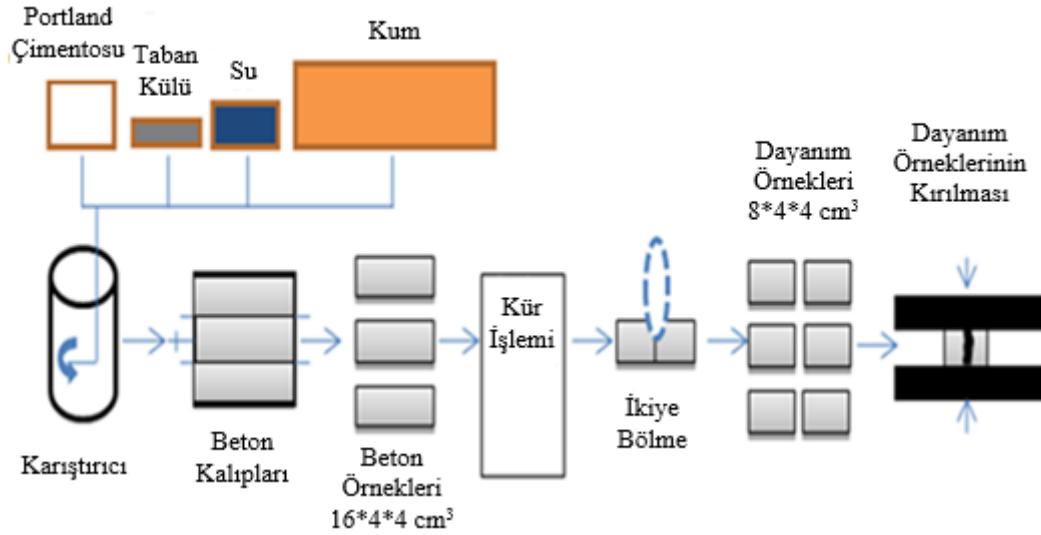
(a)



(b)

Şekil 7.14 (a) Dayanım makinesinde kırma, (b) Kırma başlıkları.

Puzolanik aktivite deneylerinin genelleştirilmiş şeması ise Şekil 7.15’de gösterilmiştir



Şekil 7.15 Puzolanik aktivite tespiti için genel akım şeması.

7.5.6 Küllerin Puzolanik Aktivite İndekslerinin Belirlenmesi

Hazırlanan beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı ölçümü işlemleri, hem deney beton örnekleri, hemde kontrol beton örneği için yapılır. Kül (puzolan) ikameli beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımlarının, kontrol beton örneğinin tek eksenli basınç dayanımına oranı kullanılan kül malzemesinin puzolanik aktivite indeksini (% PAI) verir. Bu değer kontrol beton örneğindeki bağlayıcı malzeme olan Portland çimentosu için % 100 kabul edilmektedir. Eşitlik 7.15’ de puzolanik malzemelerin % PAI bulunması için kullanılan matematiksel bağıntı verilmiştir.

$$\% PAI = \frac{\text{Kül ikameli betonun dayanımı(MPa)}}{\text{Kontrol betonunun dayanımı(MPa)}} \times 100 \quad (7.15)$$

7.6 DENEYSEL SONUÇLAR

Deneyisel sonuçlar verilirken, karıştırma hızının etkisinin incelendiği öğütme deneylerindeki bir durumu belirtmek yararlı olacaktır. Bu grup öğütme deneylerinde ürünlerin tane boyutları ve tüketilen özgül enerji miktarı incelendiğinde, uzun öğütme sürelerinde tüketilen özgül enerjinin çok fazla olması ve sabit karıştırma hızındaki öğütme deneylerinden elde edilen tane boyutu puzolanik aktivite ilişkisi bilgilerine dayanarak 10 dk ve daha uzun sürelerde puzolanik

aktivite ölçümü yapılmamıştır. Bu yüzden karıştırma hızının etkisinin incelendiği deneylerde 5 dk öğütme süresinde elde edilen puzolanik aktivite indeksi sonuçları, diğer öğütme gruplarındaki 5 dk ve daha kısa öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin puzolanik aktivite indeksi sonuçları ile birleştirilip karşılaştırılmıştır.

İnce öğütülmüş taban külü ve uçucu külün 1 yıllık puzolanik aktivite indeksleri sonuçları da verilmiştir. Son olarak tüm karıştırma hızları ve öğütme sürelerindeki boyut, özgül enerji, Blaine yüzey alanı analiz sonuçları genelleştirilmiş çizelge ve grafiklerle sunulmuştur.

7.6.1 Sabit Karıştırma Hızında Öğütme Deneyi Sonuçları

Sabit karıştırma hızı (900 d/dk) ve farklı öğütme sürelerinde uygulanan öğütme deneyi ürünlerinin ve diğer bağlayıcı maddelerin boyut analizi sonuçları, bu başlık altında incelenmiştir. Ayrıca, öğütme işleminde tüketilen özgül enerji ile öğütme ürününün tane boyutu özellikleri arasındaki ilişki ve TK öğütme ürünleri ile diğer bağlayıcıların (PÇ ve UK) puzolanik özellikleri belirtilmiştir.

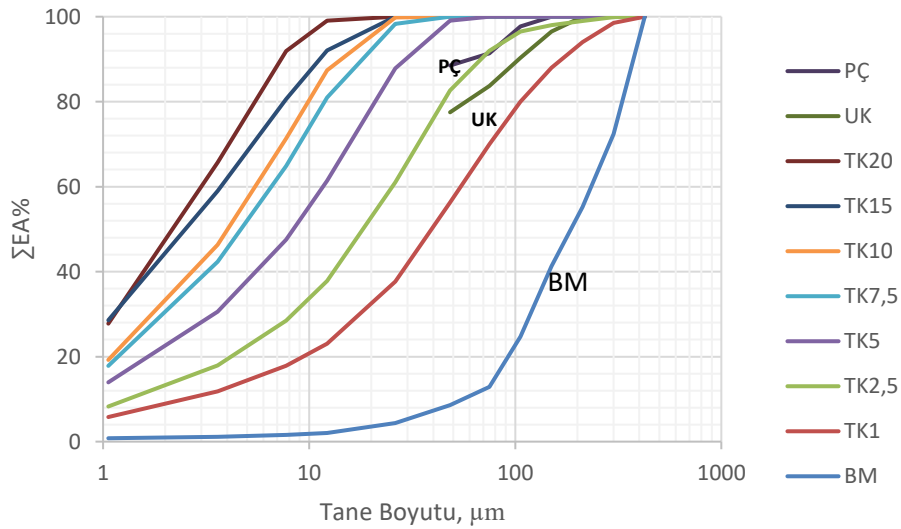
7.6.1.1 Öğütme Ürünleri ve Diğer Bağlayıcı Maddelerin Boyut Analizi Sonuçları

Sabit karıştırma hızında yapılan deneylerden elde edilen ürünlerin boyut analizi sonuçlarının zamana göre değişimi ve bunların doğal UK ve PÇ'nun boyut dağılımları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Çimento bağlayıcılarından olan PÇ ve UK'ün tane boyut dağılımı değerleri elek analizi işlemlerinden elde edilmiştir. Bu değerler malvern boyut ölçüm cihazında yapılan boyut analizlerinde kullanılan tane boyutlarına göre iterasyon işlemleri uyarlanarak yazılmıştır. Çizelge 7.7'de çimento ikamesi olarak kullanılan TK'leri, KD' de öğütülme sürelerine göre, diğer bağlayıcılar ise kısaltma isimlerine göre kodlanmıştır. KD'de öğütülmemiş TK ise BM olarak kodlanmıştır. Karşılaştırma sonuçları Şekil 7.16'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.7 Taban külü, çimento ve uçucu külün elek analizleri.

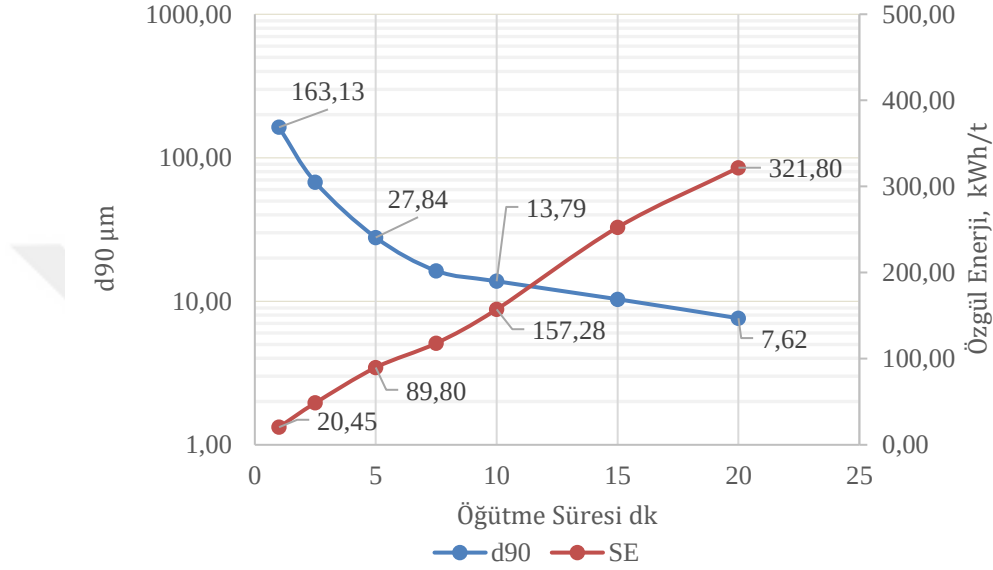
Tane Boyutu (μm)	BM	TK1	TK2,5	TK5	TK7,5	TK10	TK15	TK20	UK	PÇ
-425+300	100,0	100,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-300+212	72,4	98,5	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-212+150	55,2	94,0	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
-150+106	41,3	88,0	98,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,5	100,0
-106+75	24,7	80,0	96,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	90,3	97,7
-75+48,27	12,9	70,0	92,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	83,7	91,4
-48,27+26,20	8,6	56,2	82,6	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	77,5	88,5
-26,20+12,21	4,4	37,7	61,1	87,8	98,3	99,8	100,0	100,0		
-12,21+7,72	2,0	23,1	37,9	61,4	81,0	87,4	92,1	99,1		
-7,72+3,60	1,6	17,8	28,5	47,5	64,9	71,3	80,6	92,0		
-3,60+1,06	1,1	11,8	17,9	30,6	42,3	46,3	59,0	65,7		
-1,06	0,8	5,8	8,3	14,0	17,8	19,2	28,6	27,8		



Şekil 7.16 PÇ, UK ve farklı sürelerde sabit karıştırma hızında öğütülmüş TK'nün birikimli elek altı miktarlarının karşılaştırılması.

7.6.1.2 Öğütmede Özgöl Enerji- Tane Boyutu İlişkisi

Sabit karıştırma hızındaki öğütme deneylerinden elde edilen ürünlerin boyut dağılımı ve özgöl enerji ilişkisi Şekil 7.17’de gösterilmiştir. Bu grafikten genel olarak hangi d_{90} tane boyutu için ne kadar özgöl enerji tüketimi gerçekleşeceği görülmektedir.



Şekil 7.17 Öğütme ürünlerinin tane boyutu ile özgöl enerji arasındaki ilişki.

7.6.1.3 Öğütme Ürünlerinin ve Diğer Bağlayıcı Maddelerin Puzolanik Aktivite İndeksleri

Sabit karıştırma hızındaki öğütme deneylerinden sonra öğütme ürünlerinin puzolanik aktivite indeksi (PAI) ölçüm deneyleri yapılmıştır. Puzolanik aktivite deneyleri PÇ ve UK ikameli çimentonun boyut analizleri de dikkate alınarak yapılmış ve karşılaştırılmıştır.

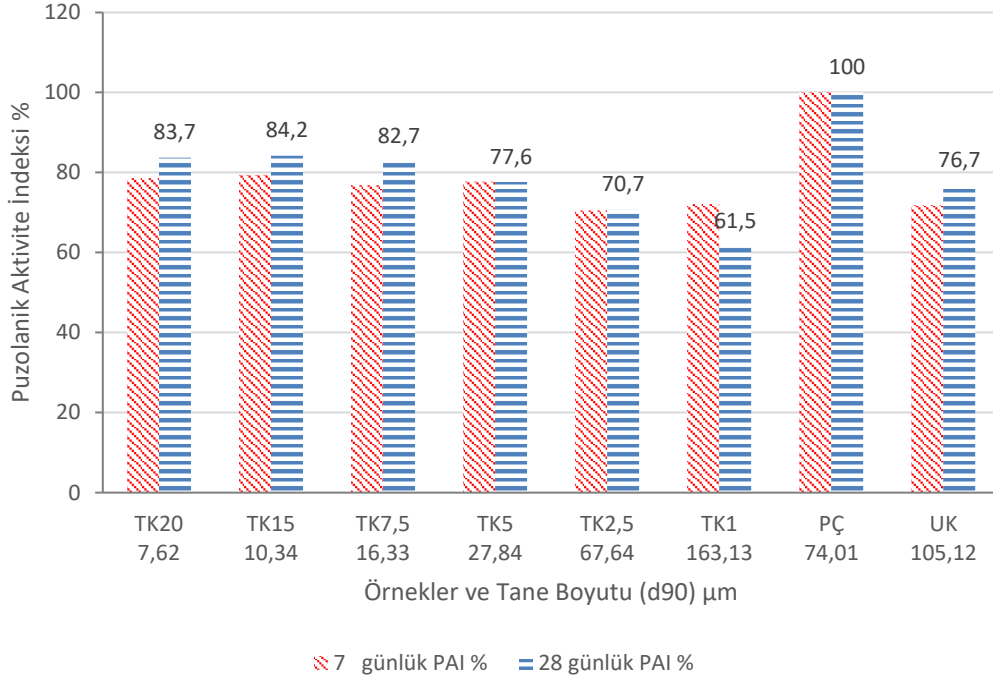
Sabit karıştırma hızındaki öğütme deneylerinde 10 dk'lık öğütme süresinde elde edilen d_{90} tane boyutunun ($13,79 \mu m$) 7,5 ve 15 dk öğütme sürelerinde elde edilen d_{90} boyutlarına yakın olması nedeniyle, 10 dk süre ile öğütme sonucu elde edilen TK'nün PAI deneyi yapılmamıştır. Bu nedenle, 1, 2,5, 5, 7,5, 15 ve 20 dk öğütme sürelerinin 7 ve 28 günlük PAI değerleri deneylerle belirlenmiştir.

Beton üretiminde kullanılan bağlayıcı kısım ve bu bağlayıcı kısmının farklı bileşimlerinin isimlendirilmesinde şu yol izlenmiştir. Kontrol beton örneğinde bağlayıcı olarak % 100 PÇ

kullanılmış ve PÇ100 olarak kodlanmıştır, UK ve TK sabit ikame oranında (% 25) PÇ ile birlikte kullanılmıştır. Karşılaştırma işlemi Çizelge 7.8'deki veriler ile çizilen Şekil 7.17'deki sütun grafiği ile gösterilmiştir. Bu deneylerde PÇ ve UK herhangi bir öğütme işleminden geçmediği için öğütme süresi ve buna bağlı özgül enerji tüketimi değerleri de yoktur.

Çizelge 7.8 Sabit karıştırma hızı (900 d/d) ve farklı sürelerde öğütülmüş taban külü ve diğer bağlayıcı madde örneklerinin % PAI değerlerinin karşılaştırılması.

Bağlayıcı Kısım	Süre	Bağlayıcı	Özgül Enerji	7 Gün		28 Gün	
Bağlayıcı Oranı		d ₉₀		Dayanım	PAI	Dayanım	PAI
% 75 + % 25	dk	µm	kWh/t	MPa	%	MPa	%
PÇ100	-	74,03	-	37,3	100,0	49,1	100,0
PÇ+UK	-	105,12	-	26,8	71,9	37,7	76,7
PÇ+TK1	1	163,13	20,5	26,9	72,0	35,1	61,5
PÇ+TK2,5	2,5	67,64	49,7	26,3	70,5	34,7	70,7
PÇ+TK5	5	27,84	86,1	29,0	77,7	38,1	77,6
PÇ+TK7,5	7,5	16,33	118,1	28,7	76,8	40,6	82,7
PÇ+TK15	15	10,34	252,5	29,6	79,4	41,4	84,2
PÇ+TK20	20	7,62	321,8	29,3	78,6	41,1	83,7



Şekil 7.18 Tane boyutuna göre çimento bağlayıcı malzemelerinin pozolanik aktivite indekslerinin değişimi.

Buna göre, taban küllerinin tane boyutu, öğütme süresi artışı ile azalırken, standartlara göre yapılan % PAI değerleri genel olarak artış göstermiştir.

7.6.2 Farklı Karıştırma Hızlarında Öğütme Deneyleri Sonuçları

Tane inceliğinin artması ile pozolanik aktivitenin değişim eğilimini belirleyebilmek için farklı karıştırma hızlarının uygulandığı öğütme deneyleri yapılmıştır. Farklı karıştırma hızlarında (300, 600, 1200 ve 1500 d/dk) daha seyrek, ancak geniş bir öğütme süresi aralığında (5, 10, 15 ve 20 dk) yeni öğütme deneyleri kurgulanmış ve veri sayısı arttırılmıştır.

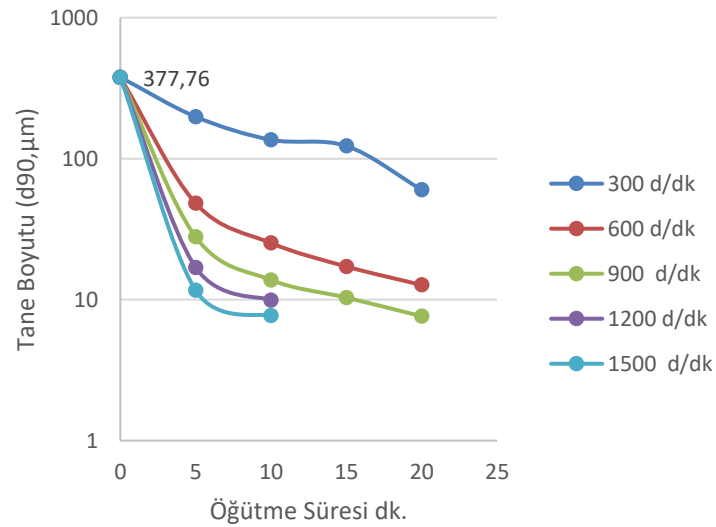
7.6.2.1 Öğütme Ürünlerinin Özgül Enerji ve Tane Boyutu İlişkisi

Karıştırma hızlarındaki değişimin tane boyutu (d_{90}) ve özgül enerji üzerindeki etkisi aynı çizelgede fakat farklı grafiklerde gösterilmiştir. Bunun nedeni birden fazla karıştırma hızında, grafiğin hem özgül enerji değişimini, hem de tane boyutu değişimini tek bir grafikte göstermenin oluşturacağı karmaşıklıktan kaçınmaktır. Farklı karıştırma hızlarının, öğütme ürününün d_{90} değerini nasıl etkilediği ve tüketilen özgül enerji değerleri Çizelge 7.9' de ve Şekil

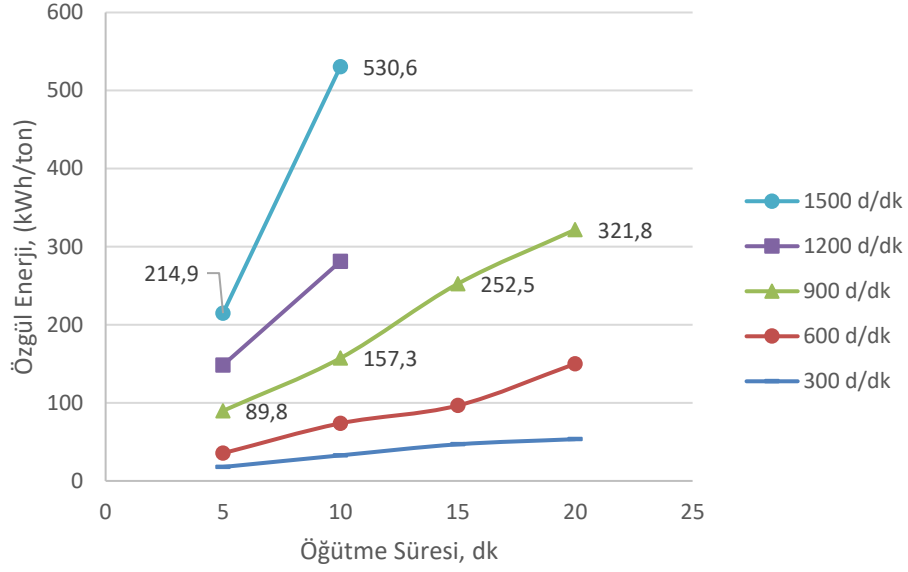
7.19 ve 7.20’de sırasıyla, tane boyutu ve özgül enerji tüketimi için ayrı olarak grafiksel gösterimle belirtilmiştir.

Çizelge 7.9 Farklı karıştırma hızı ve öğütme sürelerinin öğütme ürünü tane boyutuna etkisi.

Öğütme Süresi			Karıştırma Hızı d/dk				
dk			300	600	900	1200	1500
5	SE	kWh/t	17,85	35,48	74,11	148,34	214,90
	d ₉₀	µm	198,25	78,21	27,84	16,92	11,63
10	SE	kWh/t	32,71	73,76	157,28	281,12	530,57
	d ₉₀	µm	136,02	25,20	13,79	9,93	7,79
15	SE	kWh/t	46,89	96,59	252,48	-	-
	d ₉₀	µm	122,95	17,17	10,34	-	-
20	SE	kWh/t	53,49	150,06	321,80	-	-
	d ₉₀	µm	60,10	12,71	7,62	-	-



Şekil 7.19 Karıştırma hızının öğütme süresine bağlı olarak ürün boyutuna etkisi.



Şekil 7.20 Özgül enerjinin karıştırma hızına ve 5-10-15-20 dk öğütme sürelerine göre değişimi.

7.6.3 Kısa Öğütme Sürelerinde Deney Sonuçları

Bu öğütme kademesinde, kendi içinde düşük ve yüksek karıştırma hızlarında öğütme olarak iki kısımda incelenmiştir. İlk olarak düşük karıştırma hızlarında (300 ve 600 d/dk) 1 ve 2,5 dk'lık öğütme sürelerinde deneyler yapılmıştır. Daha sonra yüksek karıştırma hızlarında (1200 – 1500 d/d) 1 ve 2,5 dk öğütme sürelerinde deneyler tekrar edilmiştir. Ayrıca, yüksek karıştırma hızlarında 0,5 ve 0,75 dk öğütme deneyleri de yapılmıştır.

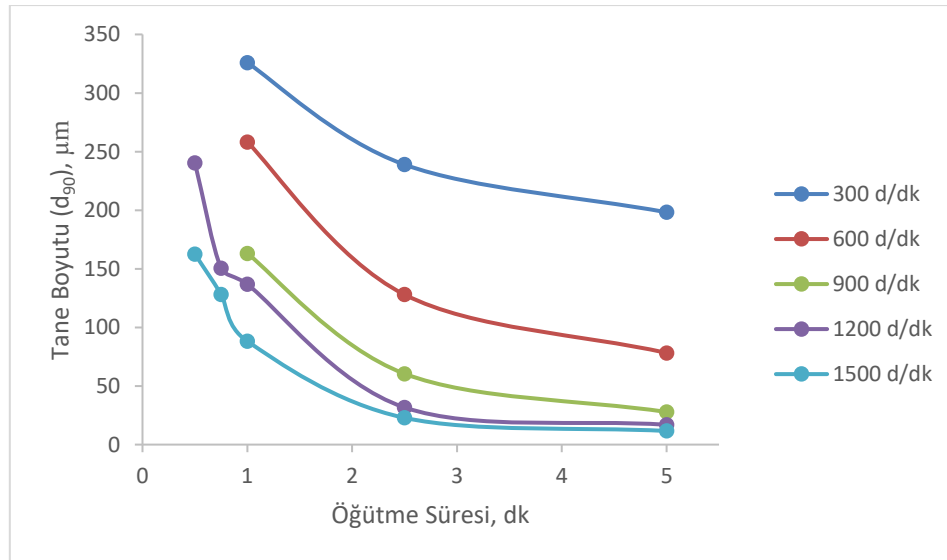
7.6.3.1 Kısa Öğütme Sürelerinde Özgül Enerji ve Tane Boyutu İlişkisi

Tüm karıştırma hızları için, 5 dk ve daha kısa sürelerde (0,50, 0,75, 1 ve 2,5 dk) uygulanan öğütme deneyi ürünleri, tane boyutu ve tüketilen özgül enerji açısından karşılaştırılmış ve Çizelge 7.10' daki birleştirilmiş tabloda gösterilmiştir.

Çizelge 7.10 Kısa öğütme sürelerinde özgül enerji ve tane boyutu ilişkisi.

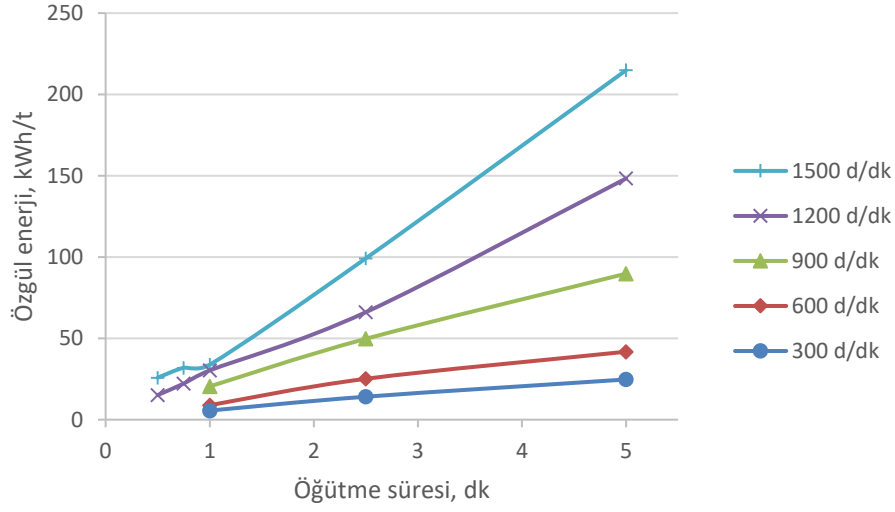
Öğütme Süresi			Karıştırma Hızı d/dk				
dk			300	600	900	1200	1500
0,5	SE	kWh/t	-	-	-	15,13	25,85
	d ₉₀	µm	-	-	-	240,40	150,39
0,75	SE	kWh/t	-	-	-	22,21	31,93
	d ₉₀	µm	-	-	-	162,58	128,18
1	SE	kWh/t	5,59	8,90	20,45	30,28	33,78
	d ₉₀	µm	325,91	258,15	163,13	136,77	73,34
2,5	SE	kWh/t	14,13	25,14	49,74	66,12	99,23
	d ₉₀	µm	238,90	127,97	60,45	31,69	22,84
5	SE	kWh/t	24,73	41,80	89,80	148,34	214,90
	d ₉₀	µm	198,25	78,21	27,84	16,92	11,63

Tane boyutunun (d₉₀) değişimi farklı karıştırma hızları için kısa öğütme sürelerinde Şekil 7.21’de gösterilmiştir.



Şekil 7.21 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızlarına göre tane boyutunun değişimi.

Özgöl enerji tüketiminin, kısa öğütme sürelerinde ve farklı karıştırma hızlarındaki değişimi Şekil 7.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.22 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızlarına göre özgöl enerji tüketiminin değişimi.

Bu kademe öğütmenin ilk alt kademesinde (düşük karıştırma hızlarında), öğütme ürünlerinin puzolanik aktivite indeksi sonuçları silis kumu ve öğütülmemiş taban külünün puzolanik aktivite indeksleri ile birlikte verilmiştir. Bunun nedeni, silis kumu ve ince öğütülmemiş TK’nün bu grupta elde edilen öğütme ürünleri ile tane boyutlarının benzerliği ve buna göre daha rahat bir karşılaştırmanın yapılabileceğinin öngörülmesidir.

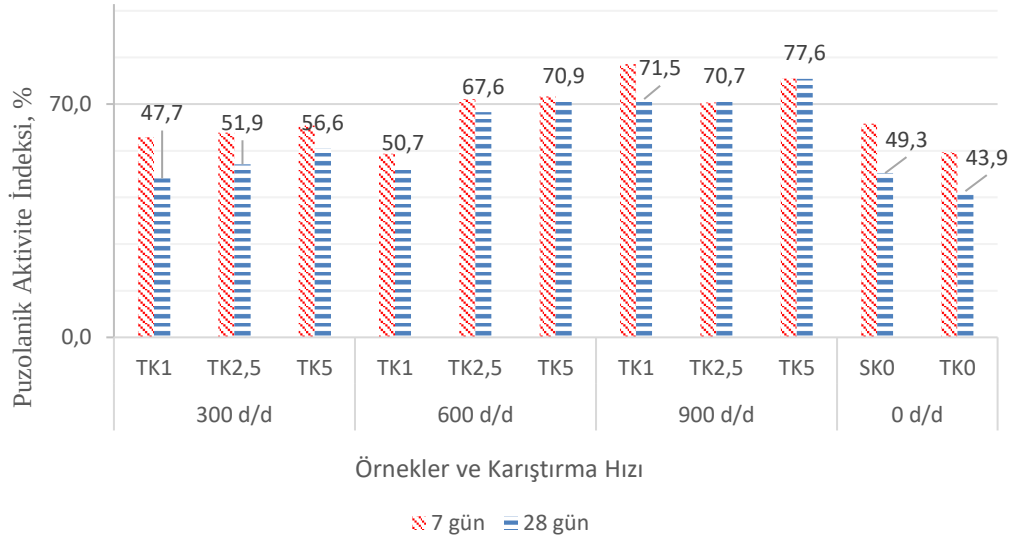
7.6.3.2 Taban Külünün Düşük Öğütme Süresi ve Karıştırma Hızlarında Puzolanik Aktivite İndeksleri

Burada, bağlayıcı maddenin tane boyutu etkisini daha geniş bir ölçekte görmek amacıyla, 300 ve 600 d/dk karıştırma hızında ve 1, 2,5 ve 5 dk öğütme süreleri sonucunda elde edilen TK ürünleri, çimento ikame malzemesi olarak kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuçlar 900 d/dk’ karıştırma hızının aynı sürelerde öğütme sürelerinin uygulandığı öğütme işlemi ürünleri ile birlikte verilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı olarak 0,5 mm altına kırılmış silis kumu ve öğütülmemiş taban külünün de 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite deneyleri sonuçları verilmiştir.

Öğütme işleminde tüketilen özgül enerji ve ürünlerin d_{90} tane boyutları da karşılaştırmaya dahil edilerek Çizelge 7.11’ de belirtilmiştir. Sonuçlar ayrıca Şekil 7.23’de sütun grafiği halinde gösterilmiştir.

Çizelge 7.11 Düşük karıştırma hızı ve öğütme süreleri için taban külünün tane boyutuna bağlı puzolanik özelliklerinin değişimi çizelgesi.

Karıştırma Hızı	Süre	Blaine Y.A.	Özgül Enerji	d_{90}	Puzolanik Aktivite İndeksi %	
d/dk	dk	cm ² /gr	kWh/t	µm	7 gün	28 gün
300	1	1522,00	5,59	325,91	60,1	47,7
	2,5	2157,00	14,13	238,90	61,4	51,9
	5	2537,85	24,73	198,25	63,5	56,6
600	1	1997,15	8,90	258,15	55,1	50,7
	2,5	3361,67	25,14	127,97	71,5	67,6
	5	4102,01	41,80	78,21	72,3	70,9
900	1	2710,50	20,45	163,13	72,0	61,5
	2,5	4066,22	49,74	67,64	70,5	70,7
	5	5503,17	89,80	27,84	77,7	77,6
SK0 (- 0,5 mm)	-	-	-	259,68	64,0	49,3
TK0 (BM) (-0,5 mm)	-	-	-	373,94	55,5	43,4



Şekil 7.23 Düşük karıştırma hızı ve kısa öğütme sürelerinde pozolanik aktivite indeksinin değişimi.

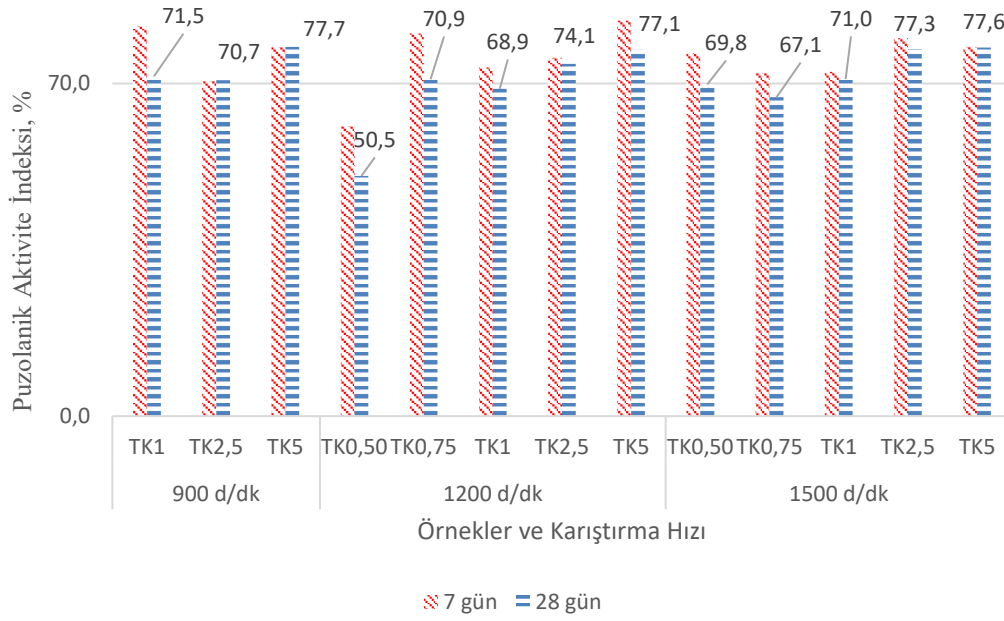
7.6.3.3 Taban Külünün Kısa Öğütme Süresi ve Yüksek Karıştırma Hızları İçin Pozolanik Aktivite İndeksleri

Yüksek karıştırma hızlarında, tekrar 5 dk ve daha kısa süreli öğütme işlemlerinin uygulandığı ikinci alt grup öğütme deneyleri tasarlanmıştır. Bu öğütme deneylerinde 1200 ve 1500 d/dk karıştırma hızlarında 0,5, 0,75, 1 ve 2,5 dk öğütme sürelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu öğütme deneylerinden elde edilen deney sonuçları diğer yüksek karıştırma hızlarının 5 dk öğütme sürelerinde elde edilen ürünlerin tane boyutu, özgül yüzey alanı, tüketilen özgül enerji ve PAI değişimleri ile birleştirilmiş ve karşılaştırılmışlardır. 900 d/dk karıştırma hızındaki öğütme sonuçlarından 1 dk öğütme süresi sonucunda elde edilen öğütme ürününün PAI değeri (% 61,50) % 70'in zaten altında olduğu için, bu kademede 900 d/d karıştırma hızı için 1 dk'nın altına inilmemiştir. Öğütme ürünlerinin pozolanik aktivite indeksi sonuçları Çizelge 7.12' de verilmiştir.

Çizelge 7.12 Yüksek karıştırma hızı ve öğütme süreleri için taban külünün tane boyutuna bağlı puzolanik özelliklerinin değişimi çizelgesi.

Karıştırma Hızı	Süre	Blaine Y.A.	Özgül Enerji	d90	Basınç Dayanımı MPa		Puzolanik Aktivite İndeksi %	
d/dk	dk	cm ² /gr	kWh/t	µm	7 gün	28 gün	7 gün	28 gün
900	1	2710,50	20,45	163,13	26,9	30,2	72,0	61,5
	2,5	4066,22	49,74	67,64	26,3	34,7	70,5	70,7
	5	5503,17	89,80	27,84	29,0	38,2	77,6	77,7
	0,50	2115,12	15,13	240,40	22,8	24,8	61,0	50,5
	0,75	2734,45	22,21	162,58	26,3	30,8	70,5	62,7
1200	1	3135,33	30,28	136,77	27,4	33,3	73,4	67,7
	2,5	5069,44	66,12	31,69	28,1	36,5	75,4	74,1
	5	6420,80	14,,34	16,92	31,0	38,0	83,2	77,1
	0,50	3043,34	25,85	150,39	28,5	32,4	76,4	65,8
	0,75	3378,45	31,93	128,18	26,9	33,5	72,2	68,1
1500	1	3881,41	42,04	73,34	27,0	35,0	72,5	71,0
	2,5	4472,54	99,23	22,84	29,7	34,6	79,6	77,2
	5	7825,22	214,90	11,63	29,0	34,8	77,7	77,6
PÇ	-	3665,04	-	74,03	37,3	49,1	100,00	100,00

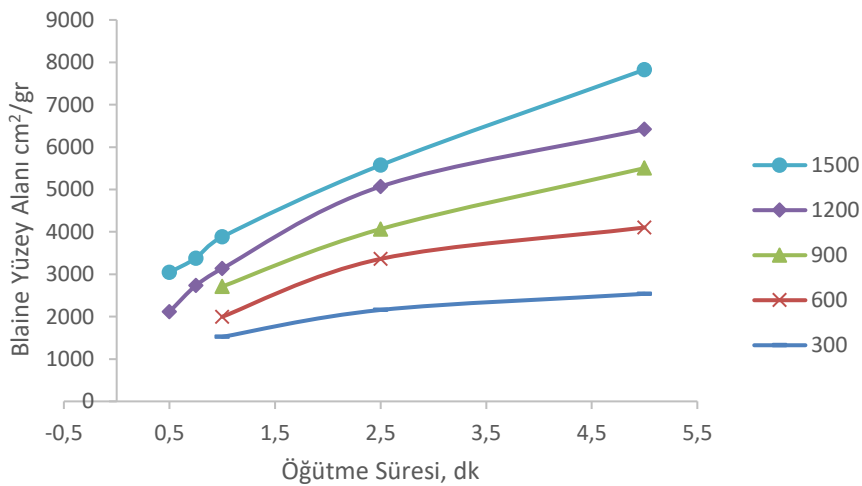
Yüksek karıştırma hızı ve düşük öğütme sürelerinde elde edilen öğütme ürünlerinin puzolanik aktivite indekslerinin değişimlerinin sonuçları ayrıca sütun grafiği halinde Şekil 7.24’de verilmiştir.



Şekil 7.24 Taban külünün yüksek karıştırma hızları ve kısa öğütme sürelerinde pozolanik aktivite indeksinin değişimi.

7.6.4 Tüm Kademelerde Kısa Öğütme Sürelerindeki Blaine Yüzey Alanının Değişimi

Tüm karıştırma hızları için 5 dk ve daha kısa sürelerde elde edilen öğütme ürünlerinin Blaine özgül yüzey alanı değerlerinin değişimi Çizelge 5.10 ve 5.11'deki özgül yüzey alanı sonuçlarının değişimleri birleştirilerek Şekil 5.25'de tek bir grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.25 Kısa süreli öğütme ürünlerinin karıştırma hızı ve öğütme sürelerine bağlı olarak özgül yüzey alanının değişimi.

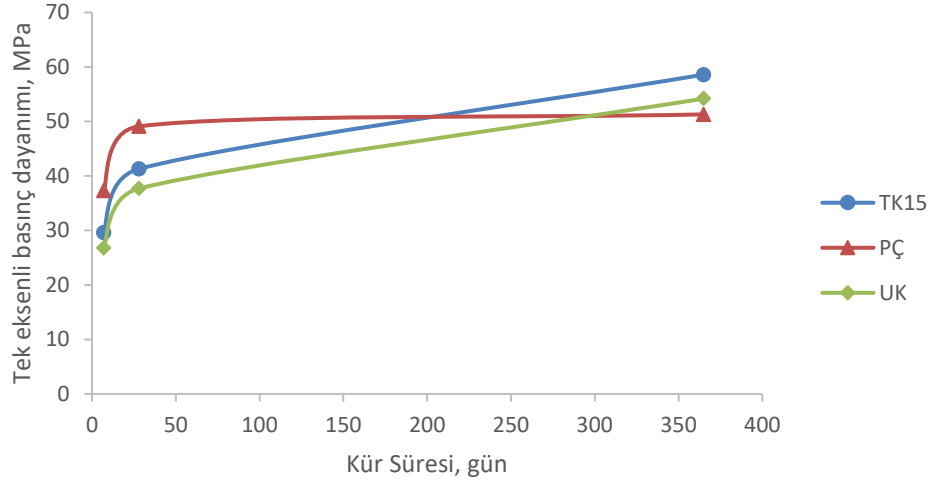
7.6.5 Taban Külü ve Uçucu Külün Uzun Süreli (1 yıl) Pozolanik Aktivite İndeksi Sonuçları

Taban külünün sabit karıştırma hızı ve farklı öğütme sürelerinde öğütülmesi ile elde edilen öğütme ürünlerinin boyut analizlerinin ardından. TK15 ve UK örneğinin, uzun kür süresi (1 yıl) sonunda PAI değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu iki bağlayıcı maddenin, PÇ'na % 25 oranında ikamesi ile hazırlanan beton örnekleri ve kontrol beton örneği, su altında 1 yıllık kür işleminin ardından tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

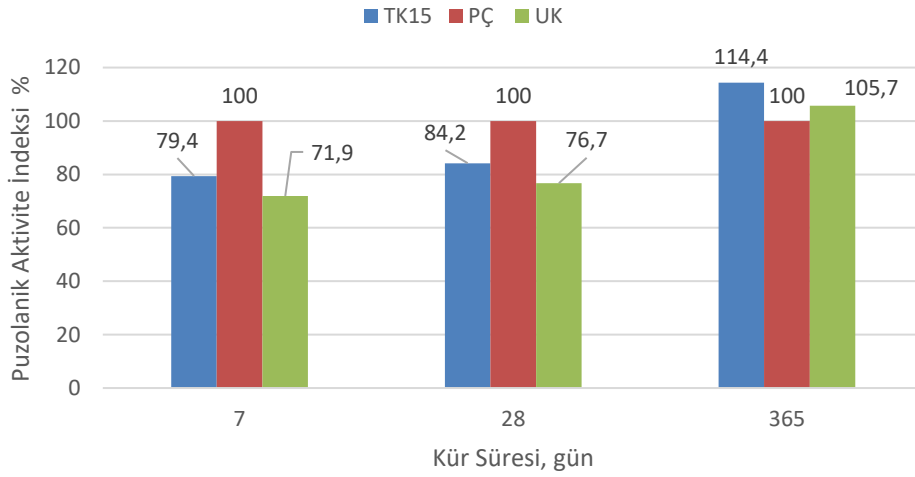
Burada elde edilen sonuçlar, aynı örneklerin 7 ve 28 günlük kür süreleri sonundaki tek eksenli basınç dayanımı değerleri ve bunlara bağlı PAI değerleri ile Çizelge 7.13' de gösterilmiştir. Şekil 5.25'de kısa ve uzun süreli kür işlemlerinde tek eksenli basınç dayanımlarının değişim sonuçları grafik halinde gösterilmiştir. Ürünlerin % PAI değerlerinin değişimi de sütun grafiği şeklinde Şekil 7.26'da gösterilmiştir.

Çizelge 7.13 İnce taban külü ve uçucu külün pozolanik aktivitesinin farklı kür süreleri için karşılaştırılması.

Pozolanik Madde	Tane Boyutu	Bağlayıcı Madde	Pozolanik Aktivite İndeksi %					
			7 gün		28 gün		365 gün	
	d90 μ m	%75 + %25	Dayanım MPa	PAI %	Dayanım MPa	PAI %	Dayanım MPa	PAI %
UK	105,12	PÇ + UK	26,8	71,9	37,7	76,7	54,2	105,7
TK15	10,33	PÇ + 900TK15	29,6	79,4	41,3	84,2	58,6	114,4
PÇ	74,03	PÇ (Kontrol)	37,3	100,0	49,1	100	51,3	100,0



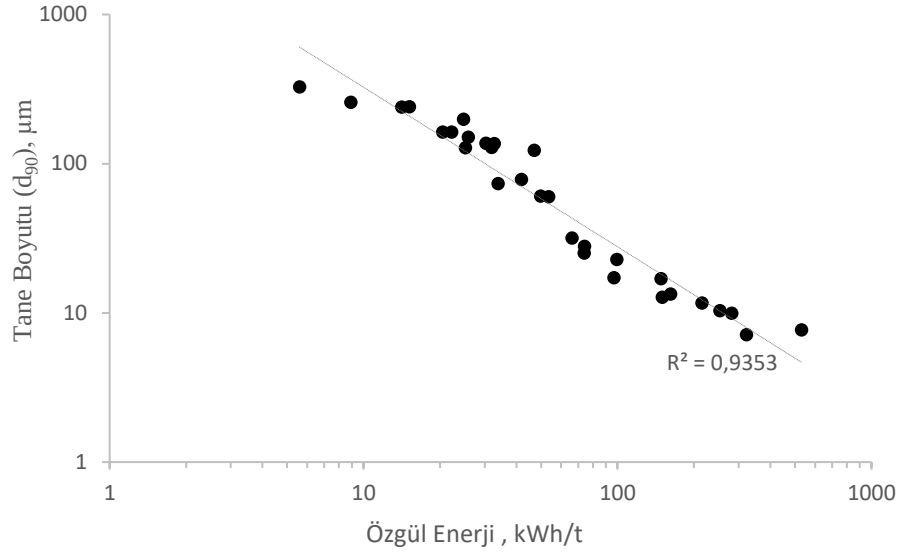
Şekil 7.26 Farklı bağlayıcı maddeler ile ikame edilen betonların kısa ve uzun kür süreleri sonundaki tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması.



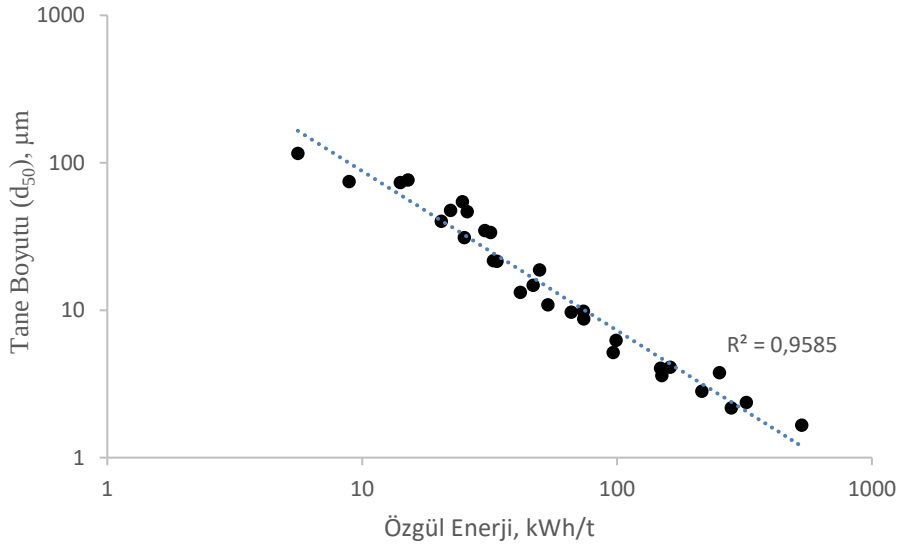
Şekil 7.27 Bağlayıcı maddelerin değişik kür sürelerinde pozolanik aktivite indeksi değerlerinin değişimi.

7.6.6 Tüm Öğütme Şartları İçin Genel Deneysel Sonuçlar

Tüm öğütme sürelerinde ve karıştırma hızlarında tüketilen özgül enerji ile öğütme ürünlerinin farklı tane boyutu değerleri (d_{90} , d_{50} ve d_{10}) arasındaki ilişki sonuçları Şekil 5.28’de verilmiştir. Özgül enerji değerleri yatay eksenle küçükten büyüğe doğru sıralanmış ve böylece karıştırma hızından bağımsız genel bir tane boyutu değişim eğiliminin gösterimi amaçlanmıştır. Aynı işlem Blaine yüzey alanı değişim eğilimi içinde Şekil 7.29’ da gösterilmiştir.



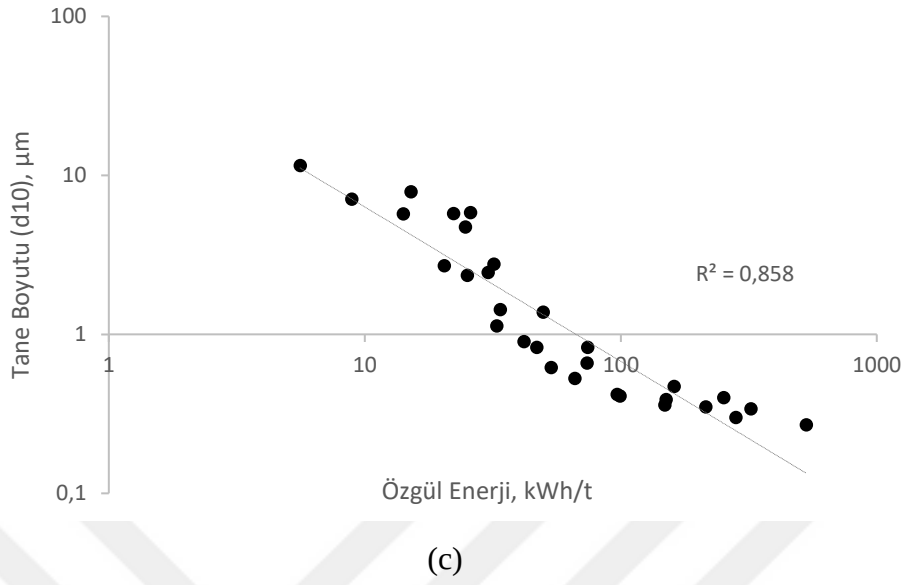
(a)



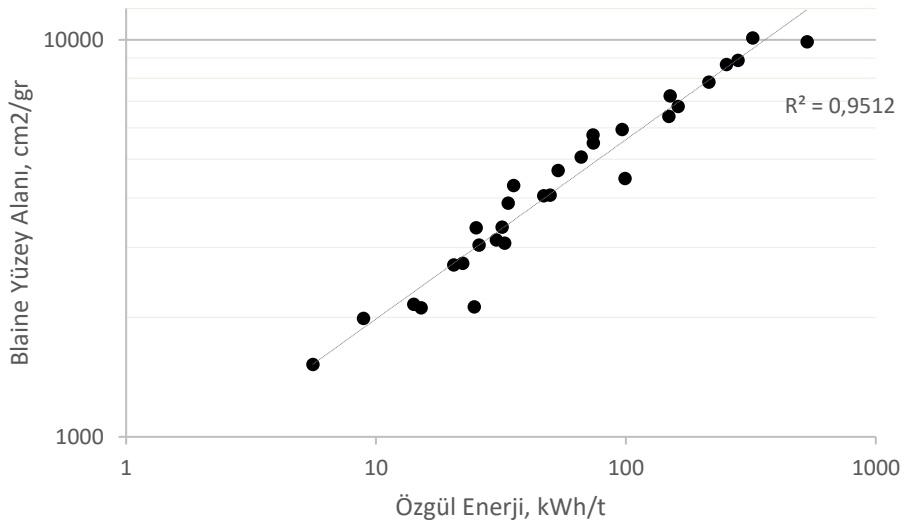
(b)

Şekil 7.28 Öğütmede tüm karıştırma hızlarında kullanılan özgül enerjinin farklı birikimli miktarlara göre a) d_{90} , b) d_{50} , c) d_{10} tane boyutuna etkisi.

Şekil 7.28 (devam ediyor)

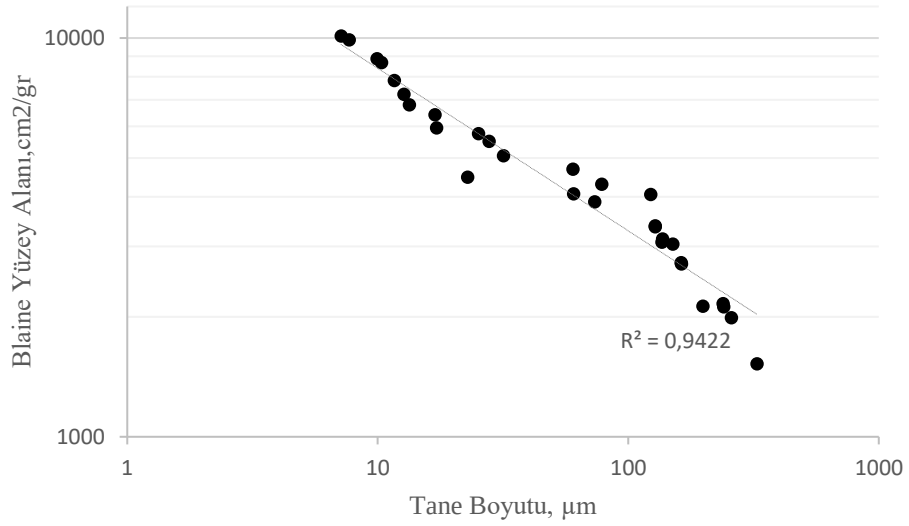


Taban küllü öğütme ürünlerinin tüm öğütme deneylerinde tüketilen özgül enerjiye göre Blaine özgül yüzey alanının değişimi Şekil 5.29’ da verilmiştir.



Şekil 7.29 Özgül yüzey alanı ve özgül enerji arasındaki ilişki.

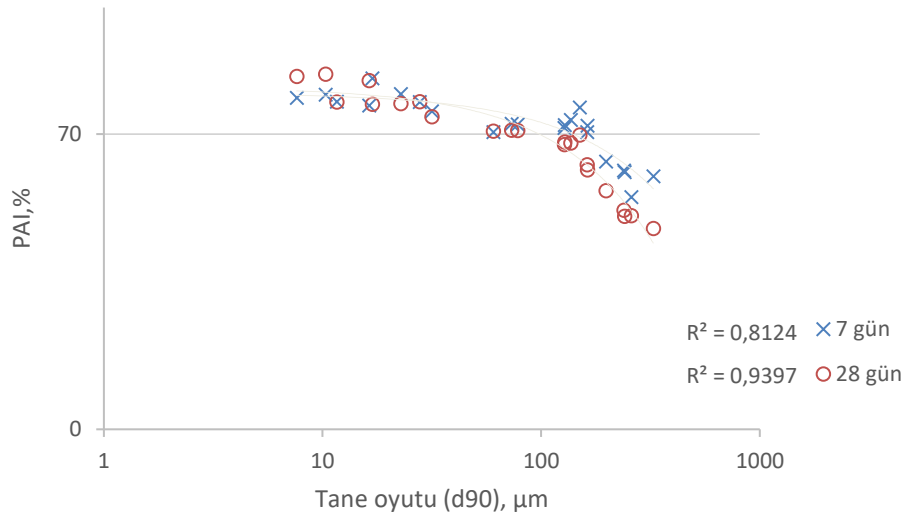
Tane boyutunun artışına göre Blaine yüzey alanı değişimi sonuçlarını görmek için artan d_{90} tane boyutu değerlerine göre Blaine yüzey alanı değerlerinin değişimi de Şekil 7.30’da gösterilmiştir.



Şekil 7.30 Özgül yüzey alanı ile tane boyutu arasındaki ilişki.

7.6.7 Tane Boyutuna Göre Genel Olarak Puzolanik Aktivite İndeksinin Değişimi

Karıştırma hızlarından bağımsız olarak TK öğütme ürünlerinin değişen d_{90} tane boyutlarına göre % PAI değişimi Şekil 7.31’da gösterilmiştir.



Şekil 7.31 Tane boyutuna göre TK’nün 7 ve 28 günlük % PAI değerlerinin değişimi.

7.7 DENEYSEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde, bu çalışma için iki önemli sınır değerinin önemini vurgulamak gerekmektedir.

Bunlardan ilki; taban külünü hazırlamak için gerekli enerjinin, mevcut çimento üretiminde tüketilen özgül enerji tüketimini artırmaması istenen en yüksek sınır değeridir. Enerji tüketimi ile ilgili bu değer; daha az çimento kullanımına bağlı enerjiden yapılabilecek tasarrufun ve azalan çevresel olumsuzluğun değerlendirilmesinde önemli bir sınır değerdir..

İkinci sınır değer ise, taban külünün tane inceliğine bağlı ve standartlara uygun şekilde sahip olması gereken en düşük % PAI sınır değeridir. Bu değer; öğütme ürünü olarak elde edilen TK'nün standartlara uygun olarak 28 günlük puzolanik aktivite indeksinin (% PAI) en az % 70 olması gerektiğini ifade eder.

Birinci sınır değer incelenmesinde, TK'nün ikame edilmesiyle, PÇ'su üretimindeki enerji ve sarf malzeme tasarrufundan kaynaklanacak kazanım ile taban külünün ikame için hazırlanmasında tüketilen enerji arasında bir karşılaştırma yapılması gerekmektedir. TK, PÇ'dan ayrı olarak hazırlandığı için, tasarruf edilen enerji birim bağlayıcı miktarına (PÇ + TK) göre hesaplanırken, TK üretiminde tüketilen enerji ise birim TK miktarına göre hesaplanmalıdır.

Genel olarak çimento üretiminde tüketilen enerji açısından şu yaklaşım yapılmıştır. Çimento tanımı ile ilgili bölümde PÇ'nin üretiminde 90 ile 110 kWh/t özgül enerji tüketimi gerçekleştiği belirtilmişti. Bu yaklaşıma göre hesap kolaylığı açısından PÇ'nin her bir tonu için 100 kWh enerji harcandığı kabul edilmiştir. Bu durum %'lik oranların karşılaştırılmasında da kolaylık sağlayacaktır. Buna göre Portland çimentosunun üretiminde % 25'lik bir taban külü ikamesi ile 25 kWh/t'luk bir enerji tasarrufu elde edilebilir. Bu değer, TK'nün bir tonu için düzenlenmesi Eşitlik 7.16' da gösterilmiştir.

$$\frac{25 \text{ kWh}}{0,25 \text{ t}} = 100 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \quad (7.16)$$

Bu yaklaşımla, 100 kWh/t değeri taban külünün hazırlanmasındaki sınır bir enerji tüketimi değeridir ve sonuçların değerlendirilmesinde bir referans bilgi olarak kullanılmıştır. Bu yaklaşım, TK ikamesi ile çimento üretiminden elde edilecek 25 kWh/t'luk tasarruf sayesinde mevcut tüketimi aşmamak için TK'nün hazırlanmasında, ton başına 100 kWh/t'luk bir enerji tüketimine kadar çıkılabileceğini ifade eder.

TK'nün çimento ikamesi için hazırlanmasında kullanılan enerjide en büyük payı TK'nün boyut küçültme kademeleri alır. TK'nün taşınması ve kurutulması için gerekli enerji de boyut küçültmede kullanılan enerji yanında ihmal edilecek derecede az olduğundan dikkate alınmamışlardır.

Bu çalışmada, TK'nün boyut küçültme kademeleri iki temel kademe olarak ele alınmaktadır. Bunlardan ilki, TK'nün KD'de öğütülebilmesi için yeterli bir besleme boyutuna ufalandığı ön boyut küçültme işlemidir (iri öğütme). Diğer kademe ise, KD'de TK'nün çimento ikamesi için nihai inceliğe getirildiği ince öğütme işlemidir. Taban külünün, iri öğütme işleminde gerekli olan enerjinin öngörülmesinde Bond deneyinde elde edilen TK iş indeksinden yararlanılmıştır. Bond deneyleri ile belirlenen taban külünün iş indeksi değeri (18,34 kWh/t) kullanılarak ölçülmüştür. Bu işlem için TK'nün besleme (F_{80}) ve ürün boyutu (P_{80}) da belli olduğu için (sırasıyla 10630 μm , 373 μm) Bond eşitliğinden, harcanan enerji için yaklaşık bir değer öngörülebilir. Bu değerın hesaplanması Eşitlik 7.17 a ve b'de belirtilmiştir.

$$W_{\text{kırma}} = 10 * W_i \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right] = 10 * 18.34 \left[\frac{1}{\sqrt{377}} - \frac{1}{\sqrt{10630}} \right] \quad (7.17a)$$

$$\text{TK iri öğütme enerjisi} = 7,72 \frac{kWh}{ton(tk)} \quad (7.17b)$$

Yeni durumda, bir ton bağlayıcı karışımı içindeki 0,25 ton TK'nü iri öğütmek için gerekli enerji Eşitlik 7.18'de hesaplanmıştır.

$$\text{TK (bağlayıcı) iri öğütme enerjisi} = 7,72 \frac{kWh}{ton(tk)} * \frac{0.25ton(tk)}{ton(b)} = 1,93 \frac{kWh}{ton(b)} \quad (7.18)$$

TK'nün ikame için uygun boyuta getirilmesinde. iri öğütülmesinin payı bir ton bağlayıcı (PÇ+TK) için. tasarruf edilen 25 kWh/t enerji içinde 1,93 kWh/t'dur. Başka bir deyişle % 7,72'lik bir paya sahiptir. İri öğütme için gerekli enerjinin düşük olması ve bu yaklaşımda taşıma ve kurutma için gerekli enerjiler hesaba katılmadığından, KD'de nihai incelikte öğütme yapmak için gerekli enerjinin teorik olarak 100 kWh/t'a yaklaşabileceği görülmektedir.

Bu yaklaşımdaki en yüksek enerji sınır değerini (100 kWh/t) aşan öğütme işlemleri. deneysel sonuçların değerlendirilmesinin ardından aşağıdaki şekilde maddeler halinde sunulmuştur.

- 300 d/dk karıştırma hızında hiçbir öğütme testinde 100 kWh/t değeri aşılamamıştır.
- 600 d/dk'da ise sadece 20 d öğütme süresinde özgül enerji değeri (150,06 kWh/t) bu sınır değeri aşmıştır.
- 900 d/dk karıştırma hızında 10, 15 ve 20 dk öğütme sürelerinde 100 kWh/t enerji aşılmıştır.
- 1200 ve 1500 d/dk karıştırma hızlarında 5 ve 10 dk öğütme sürelerinde 100 kWh/t'luk tüketimin üzerinde enerji harcanmıştır.

Deneysel sonuçların incelenmesinden sonra. puzolanik aktivite indeksi ile ilgili ikinci önemli sınır değer için kabul edilebilecek en düşük 28 günlük % 70'lik PAI değerine göre şu değerlendirmeler yapılmıştır.

- 300 d/dk karıştırma hızında 28 günlük PAI değeri herhangi bir sürede öğütme işleminde elde edilen öğütme ürünü için % 70'in üzerine çıkmamıştır.
- 600 d/dk karıştırma hızında ise sadece 5 dk öğütme süresinde elde edilen ürünün (600TK5) 28 günlük PAI değeri (% 70,88) % 70'i geçmiştir.
- 900 d/dk karıştırma hızında 900TK2,5 ve daha uzun süreli öğütme ürünleri % 70'in üzerinde PAI değerlerini vermişlerdir.
- Daha yüksek karıştırma hızlarında; 1200 d/dk karıştırma hızı için 2,5 ve 5 dk süreli öğütme ürünleri (1200TK2,5 ve 1200TK5) sırasıyla 28 günlük % 74,11 ve %77,12 PAI değerleri ile bu koşulu sağlamıştır.
- 1500 d/dk karıştırma hızı için 1, 2,5 ve 5 dk süreli öğütme ürünleri (1500TK1. 1500TK2,5 ve 1500TK5) % 70,95, % 77,25 ve %77,60'lık 28 günlük istenen % PAI değerlerine ulaşabilmişlerdir.

Bu çalışmada, TK'nün KD'de öğütme sürelerine bağlı olarak inceliği arttıkça 7 ve 28 günlük % PAI değerleri artmıştır. TK'nün inceliğinin artışı ile % PAI değerinin artışına ilişkin bazı çalışmalar rapor edilmiştir (Gonzales et al. 2017). Jaturapitakkul and Cheerarot (2003) TK'nü % 95'i 45 μm altına geçecek şekilde öğüttüklerinde, % PAI değerininin % 70'in üzerinde olduğunu göstermişlerdir. Cheriaf et al. (1999), tamamı 100 μm 'dan ince olan taban külü örneğini 6 saat süre ile öğüttükten sonra, 28 günlük % PAI değerinin % 27 oranında arttığını göstermişlerdir. Kızgüt vd. (2010) KD ile d_{88} boyutu 75 μm olan TK örneğininin 28 günlük % PAI değerini % 25 ikame oranı için yaklaşık % 77 olarak bulmuşlardır. Tekin (2018) çalışmasında d_{90} ve d_{50} değerleri sırasıyla 60,0 ve 27,5 μm olan taban külü örneğini süper akışkanlaştırıcı katkısı ile % 20 ve 30 oranında PÇ42.5R çimentosu ile ikame ettiklerinde 28 günlük % PAI değerini bu ikame oranları için sırasıyla % 85 ve 72 olarak rapor etmişlerdir.

Bu çalışmada. d_{90} ve d_{50} tane boyutları. sırasıyla 373,94 ve 173,12 μm olan taban külü, ince öğütülmeden % 25 oranında Portland çimentosuna ikame edildiğinde, ölçülen % PAI değeri 43,88 olarak belirlenmiştir. Jaturapitakkul and Cheerarot (2003)'un çalışmasında. ortalama tane boyutu (d_{50}) 290 μm olan taban külü örneğini öğütmeden % 20 ve 30 oranında Portland çimentosuna ikame ettiklerinde 28 günlük % PAI değerini sırasıyla % 49 ve % 33 olarak bulmuşlardır.

Tane boyutu ile % PAI değeri arasındaki ilişkiler incelendiğinde, öğütme süresindeki artış ile farklı karıştırma hızları için 28 günlük % 70'lik PAI alt sınır değerine ilk ulaşan TK ürünleri 600TK5, 900TK2,5 ve 1500TK1 öğütme ürünleridir. Bu öğütme ürünlerinin, aynı karıştırma hızları için daha uzun süre öğütüldüklerinde, tane inceliği ve % PAI değerleri daha da artmıştır. Bu nedenle, 600TK5, 900TK2,5 ve 1500TK1 örnekleri istenen % PAI sınırını zaten geçmiş oldukları için ilk irdelenen öğütme ürünleri olmuşlar ve çalışmanın bundan sonraki bölümünde anlam kolaylığı açısından referans TK örnekleri olarak isimlendirilmişlerdir. Bu referans TK ürünlerinin d_{90} tane boyutu değerleri, sırasıyla 78,21, 67,64 ve 73,34 μm , % PAI değerleri sırasıyla; % 70,88, % 70,70 ve % 70,95 olarak ölçülmüştür. KD'de bu ürünler için tüketilen özgül enerji değerleri ise sırasıyla; 41,82, 49,74 ve 42,04 kWh/t olarak ölçülmüştür. Son olarak Blaine özgül yüzey alanları sırasıyla; 4300,37, 4066,22 ve 3881,41 cm^2/g olarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın deneysel kısmında kullanılan Portland çimentosunun Blaine değeri ise 3665,04 cm^2/gr 'dır. Buradan. taban külünün istenen % PAI değeri için d_{90} tane boyutu değerinin yaklaşık 80 μm altına getirilmesinin yeterli olabileceği ve bunun da yaklaşık 40-50 kWh/t'luk

enerji ile elde edilebileceği görülmektedir. Ayrıca bu tane boyutu PÇ'nin d_{90} tane boyutuna (74,03 μm) yakındır.

Bu tez çalışmasındaki referans TK örneklerinin % PAI değerleri (ortalama % 71) birbirine çok yakındır. Literatürdeki benzer çalışmalarda ise şu şekilde sonuçlar elde edilmiştir. Abdulmatin vd. (2018) TK'nü % 20 oranında PÇ'ye ikame ettiklerinde, bu çalışmadaki referans TK ürünlerinin tane boyutlarına yakın, 45 μm 'luk elek üstü miktara göre düzenlenmiş ve sırasıyla yaklaşık d_{85} , d_{75} ve d_{65} tane boyutu 45 μm olan taban külleri ile hazırladıkları beton örneklerinin tek eksenli basınç dayanımı değerlerini sırasıyla 36,7, 34,8 ve 30,2 MPa olarak rapor etmişlerdir. Bu ürünlerin % PAI değerleri ise sırasıyla % 91, % 87 ve % 75 olarak hesaplanmıştır.

Klinker öğütmede tüketilen özgül enerji genel olarak 40-45 kWh/t'dur (Genç 2008). Bajare et al. (2013) yaptıkları çalışmalarında, bir ton çimentoyu 4500 cm^2/gr özgül yüzey alanında üretebilmek için yapılan genel hesaplamalara göre öğütmede 47 kWh enerji tüketiminin gerekli olduğunu rapor etmişlerdir. HPGR'ın bilyalı değirmen öncesinde kapalı devre olarak kullanıldığı bazı endüstriyel çalışmalarda, öğütmede harcanan özgül enerji 25-27 kWh/t'a kadar düşürülebildiği gözlemlenmektedir (Ergün 2021).

Bu çalışmada yapılan öğütme deneyleri açık devre yöntemi ile yapılmıştır. Referans TK örnekleri için KD'de tüketilen özgül enerji değerleri 41,82, 49,74 ve 42,04 kWh/t olarak ölçülmüştü. Açık devre öğütme işleminde, istenilen aynı tane inceliğini elde etmek için tüketilen özgül enerji, kapalı devre öğütme işlemlerinden daha fazladır. Bu nedenle, KD'nin değirmen sonrasında bir sınıflandırıcı ile kapalı devre yöntem ile çalışması TK'nün daha az enerji tüketimi ile istenilen tane inceliğine ulaşabilmesini sağlayacaktır.

Tane boyutu ile özgül enerji tüketimi incelendiğinde, üst sınır özgül enerji tüketimine (100 kWh/t) en çok yaklaşan enerji tüketimlerinin gerçekleştiği öğütme ürünlerinde (900TK5 ve 1500TK2,5) özgül enerji tüketimleri sırasıyla 89.8 kWh/t; 99.23 kWh/t iken, d_{90} boyutları 27,94 μm ve 22,84 μm olarak ölçülmüştür. Bu boyutlardaki TK öğütme ürünlerinin 28 günlük % PAI değerleri sırasıyla % 77,7 ve % 77,6 olarak ölçülmüştür. Burhanudin et al. (2018) çalışmalarında ise, bu tez çalışmasındaki 900TK5 ve 1500TK2,5 örneklerine çok yakın tane boyutlarındaki TK örnekleri için % PAI değerini % 90'a yakın bulmuşlardır.

Tüm öğütme işlemlerindeki özgül enerji değerleri ile öğütme ürünü tane boyutları (d_{90} , d_{50} ve d_{10}) arasındaki ilişkiler. farklı karıştırma hızları için tek bir grafikte gösterildiğinde, karıştırma hızından bağımsız ve doğrudan tüketilen özgül enerji ile tane boyutu arasındaki ilişkileri gösteren bağıntılar türetilir. Tüketilen özgül enerjideki artışa göre tane boyutu değerlerinin ters orantılı bir şekilde azaldığı ve d_{50} tane boyutlarının tüketilen özgül enerji ile diğer boyutlara (d_{90} , d_{10}) göre en yüksek ilişki katsayısı ile azaldığı görülmektedir. Pilevneli (2003) çalışmasında, laboratuvar ve pilot çaplı KD' lerde yapılan öğütme deneyleri ürünlerinin tane boyutu analizlerini incelediğinde, bu çalışmadakine benzer sonuçlar elde etmiştir. Bu durum d_{90} boyutu için öğütücü ortamın iri taneleri kavramasındaki yetersizlik olarak açıklanırken. d_{10} boyutu için aşırı ince tanelerin yastıklama etkisi ile açıklanmaktadır.

Öğütmede özgül enerji tüketimlerine göre Blaine yüzey alanı değerleri. farklı karıştırma hızları için tek bir grafikte gösterildiğinde. tekrar karıştırma hızından bağımsız, doğrudan özgül enerji artışına bağlı doğru orantılı Blaine yüzey alanı değişimleri görülmektedir. Burada, doğrudan özgül enerjiye bağlı Blaine değerlerinin öngörülmesi için gerekli bazı yaklaşımlar türetilir.

Uzun süreli kür işlemi sonucundaki pozolanik aktivite etkisini incelemek için, aynı deney şartlarında çok ince öğütülmüş bir TK örneği (900TK15), UK örneği ve PÇ ile hazırlanan beton örneklerinin (kontrol beton örneği) 1 yıllık pozolanik aktivite deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucu, aynı örneklerin 28 günlük ve 7 günlük tek eksenli basınç dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Portland çimentosunun kullanıldığı kontrol beton örneğinde kür süresine göre dayanım artışı 28 günden 1 yıllık kür süresine kadar diğer pozolan ikameli çimentolara göre çok az değişmiştir. Buna göre. PÇ'sunun 28. günden sonra birinci yılın sonuna kadar tek eksenli basıncı 49,1 MPa'dan 51,3 MPa değerine % 4'lük bir artış gösterirken, diğer TK ve UK ikameli çimentolarla hazırlanan örneklerde aynı kür süreleri için artışın sırasıyla % 21,3 ve % 44 olduğu görülmektedir.

Uçucu kül ile taban külü pozolanik aktivite yönünden karşılaştırılırsa. uçucu külün 28 günlük % PAI değeri % 76,7 olarak ölçülürken, taban külünün benzer % PAI değerlerini veren taban külü öğütme örnekleri 900TK5, 1200TK2,5, 1200TK5, 1500TK2,5 ve 1500TK5 kodlu öğütme ürünleridir. Bu ürünlerin % PAI değerleri sırasıyla % 77,7, % 74,11, % 77,12, % 77,25 ve % 77,60' dır. Bu ürünlerin d_{90} tane boyutu değerleri ise tekrar sırasıyla 27,84 μm , 31,69 μm , 16,92 μm , 22,84 μm ve 11,63 μm 'dur. Bu çalışmada TK'nün, uçucu ile aynı pozolanik özellikleri göstermesi için UK'den daha ince boyutlara getirilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ancak, Kula vd. (2001) birbirine çok yakın tane inceliğine öğütülen ($d_{75} = 40 \mu\text{m}$) TK ve UK örneklerinin puzolanik aktivitelerinin birbirine yakın olduğunu, hatta taban külünün çalışmada UK'e göre biraz daha fazla öğütülmesine ve dolayısıyla daha ince olmasına da bağlı olarak 28 günlük %PAI değerini bir miktar yüksek olduğunu rapor etmişlerdir.

KD'ler, istenen tane inceliği $75 \mu\text{m}$ 'dan daha aşağı inildikçe geleneksel değirmenlere göre, daha az enerji tüketimi avantajları ile öne çıkmaktadırlar Bu durum, KD'lerin TK'nın öğütülerek çimento ikamesinde daha yüksek dayanımın arandığı betonların üretilebilmesinde önemli bir avantaj elde etmesini sağlayabilir.



BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aynı karıştırma hızı için öğütme süresi arttıkça, TK'nün tane inceliği, Blaine yüzey alanı, öğütmede tüketilen özgül enerji ve % PAI değerinin arttığı genel bir sonuç olarak görülmektedir.

Bu tez çalışmasında göze çarpan temel sonuçlardan biri, TK'nün öğütülmeden çimentoya ilave edilmesinin, üretilecek betonun dayanımına herhangi bir katkısının olmamasıdır. Bununla birlikte, TK'nün yaklaşık PÇ boyutuna kadar inceltilmesinin, standartlara uygun puzolanik özellikler göstermesi için yeterli olduğu görülmektedir. TK'nün çok ince öğütülmesine gerek olmayışı da önemli ve olumlu bir diğer sonuçtur.

TK'nün öğütülmesinde tüketilen özgül enerjinin artışı ile d_{90} , d_{50} ve d_{10} tane boyutu değerlerindeki azalmanın en yüksek ilişki katsayısı ile d_{50} boyutunda gerçekleştiği görülmektedir. Bu veri, TK'nın KD' de öğütme işleminin özellikle laboratuvar ölçekten endüstriyel ölçeğe uyarlanmasında büyük önemi olan modelleme işlemlerinde önemli bir bilgi olarak değerlendirilebilir.

Yaklaşık PÇ boyutuna getirilen TK, eğer daha da inceltilerek kullanılırsa doğrudan çimentodan istenen dayanıma (kontrol betonu dayanımına) yaklaşılabileceği görülmektedir. Uzun süreli PAI deneylerinde, TK inceliğinin artmasının, yüksek beton dayanımının gerekli olduğu durumlarda olumlu sonuçlar verebileceği görülmektedir.

Bu çalışmada, TK ve UK'ün % PAI değerleri karşılaştırıldığında, benzer % PAI değerlerini verebilmeleri için, TK tane boyutunun UK tane boyutuna göre daha çok inceltilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ilerleyen çalışmalarda deneysel olarak incelenebilir.

Genel olarak, 28 günlük puzolanik aktivite, 7 günlük puzolanik aktiviteye göre inceleşen tane boyutu için daha yüksek bir ilişki katsayısı ile artış göstermiştir. Kül ikamesinin PÇ'sunun

bağlayıcılık özelliğini, özellikle kısa kür işlemlerinde düşürdüğü, uzun süreli (365 gün) kür işlemi sonucunda ise, % PAI değerlerinin % 100'ü bile geçtiği gözlenmiştir. TK ve UK'un bu anlamda daha ayrıntılı bir şekilde karşılaştırılması için birbirine yakın tane boyutundaki UK ve TK örneklerinin yukarıda belirtilen kür süreleri (60, 90 ve 180 gün) arasında da % PAI deneylerinin de yapılması anlamlı olacaktır.

Bu çalışmada, TK'nün PÇ'na ikame oranı (% 25) sabit tutulmuştur. TK'nün ikame oranının artması ile % PAI değerinin azaldığı literatürde genel olarak ortaya konulmaktadır. Bu durum TK'nün çimento ikamesinde kullanımını sınırlayan bir unsur olarak ortaya çıkabilir. Ancak çevresel ve ekonomik faydalar elde edileceği de görülmektedir. Bu nedenle, TK'nün kullanımına ilişkin gelecekteki araştırmalar için ikame oranının artırılması dikkat çekici bir konu olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada TK'nün PÇ ikamesi için hazırlanmasında yapılan öğütme deneyleri, malzemenin KD'den doğrudan geçirildiği açık devre öğütme sistemine göre yapılmıştır. Kapalı devre öğütme işlemlerinde enerji daha verimli kullanıldığı için, ilerleyen çalışmalarda da TK'nün KD ile birlikte bir sınıflandırıcının kullanıldığı laboratuvar veya pilot ölçekli kapalı devre öğütme deneyleri ile hazırlanması, KD'lerin bu alandaki avantajını enerji tüketimi yönünden pekiştirecek sonuçlar verebilme potansiyeline sahiptir.

KAYNAKLAR

- Abdulmatin A, Tangchirapat W and Jaturapitakkul C** (2018) An investigation of bottom ash as a pozzolanic material. *Construction and Building Materials*, 186:155–162.
- Altun O** (2013) Investigation of dry horizontal stirred milling applications for cement grinding circuits. *Doktora Tezi*. Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 182 s.
- Austin L G** (1973) A commentary on the Kick, Bond and Rittinger laws of grinding. *Powder Technology*, 7(6): 315 – 317.
- Austin L G, Klimpel R R and Luckie P T** (1984) *Process Engineering of Size Reduction Ball Milling*. Society of Mining Engineers, New York, 561 p.
- Aydoğan A ve Ergün Ş L** (2004) Yüksek basınçlı merdaneler. *Madencilik*, 43(3):27-37.
- Bajare D, Bumanis G and Upeniece L** (2013) Coal Combustion Bottom Ash as Microfiller with Pozzolanic Properties for Traditional Concrete. *11th International Conference on Modern Building Materials. Structures and Techniques*, 57: 149 – 158.
- Basu S and Debnath A K** (2019) *Power Plant Instrumentation and Control Handbook. Advanced Ultrasupercritical Thermal Power Plant and Associated Auxiliaries*. Chapter 13. second edition, London, San Diego, Cambridge, Oxford, 1135 pp.
- Bilgin Ö ve Koç E** (2013) Çimento Üretim Teknolojisinde Kullanılan Ana Ekipmanlar. *Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 4:31-40.
- Burhanudin M K, İbrahim M H W, Sani M S H M, Juki M I, Jamaludin N, Jaya R P, Shadian S, Basirun F and Bosro M Z M** (2018) Influence of ground coal bottom ash with different grinding time as cement replacement material on the strength of concrete. *Malaysian Construction Research Journal*, 4(2):93- 102.
- Celep O, Alp İ ve Türk T** (2008) İnce öğütme teknolojisinde karıştırmalı ortam değirmenleri ve cevher hazırlamadaki uygulamaları. *İstanbul Yer Bilimleri Dergisi*, 21(2) : 61-73.
- Cheriaf M, Rocha J C and Péra. J** (1999) Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash. *Cement and Concrete Research*, 29: 1387-1391.
- Chuang K H, Lu C H, Chen J C and Wey M Y** (2018) Reuse of bottom ash and fly ash from mechanical-bed and fluidized-bed municipal incinerators in manufacturing lightweight aggregates. *Ceramics International*, 44(11) : 12691-12696.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Çağlayan M, Haperveren S, İpekoğlu B ve Kurşun İ** (1999) Beton yapımında kullanılan agregaların özellikleri ve örnek bir kuruluş. 2. *Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, 69-79.
- ÇŞB (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı).** (14/12/2019) Adres: <https://webdosya.csb.gov.tr/db/sanayihavarehberi/icerikler/c-mento-uret-m 0200110113349.pdf>.
- Demir U, Çınar M, Şahbaz O ve Karagüzel** (2007) Endüstride Kullanılan Mikronize Öğütme Makineleri. *I. Maden Makineleri Sempozyumu*, Kütahya, 10-12 Mayıs, 197-207.
- Dikmen S ve Ergün Ş L** (2004) Karıştırmalı Bilyeli Değirmenler. *Madencilik*, 43(4): 3-15.
- DPT** (2001) Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu *Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayii Hammaddeleri IV* (Çimento Hammaddeleri) Çalışma Grubu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı.
- Dündar H** (2012) Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmenlerin Mineral Endüstrisinde Cevher Öğütme Performanslarının İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 126 s.
- Eirich TowerMill - Vertical agiated media mill.** (21.02.2018) *Google*. Adres: https://www.eirich.com/fileadmin/user_upload/Eirich_Bilder/1.Produkte_Verfahren/2.Mahltechnik/5.TowerMill/TM1843_3_en.pdf.
- Ergin K, Erçelebi S ve Kirmanlı C** (1999) Çimento Hammadde Üretim Optimizasyonu İçin Yeni Teknolojiler. 3. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 14-15 Ekim 1999, İzmir, Türkiye, 87-96.
- Ergün Ş L** (2021) Kişisel görüşme, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, (20.03.2021).
- Eryanto T and Amrina E** (2015) Determination of Optimal Clinker Factor in Cement Production by Chemical Grinding Aids Addition. *Applied Mechanics and Materials*, 776: 223-228.
- FABO Kırma eleme tesisleri ve beton santralleri.** (2020) *Google*. Adres: <https://drive.google.com/file/d/1qKVRNTToLM9jWztxDS7HZ458IGX-yIhU9/view>.
- FLSmidth** (2020) *google*. Adres: <https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-media/brochures-products/milling-and-grinding/2020/ball-mill-for-cement-grinding.pdf>.
- Fonteboa B G, Lopez D C and Brito J** (2017) Comparison of ground bottom ash and limestone as additions in blended cements. *Materials and Structures*, 50(84): 1871-1884.
- Gaudin A M** (1939) Principles of Mineral Dressing Hardcover – I. Baskı. 23030. Mcgraw-hill Book Company, London, 554 s.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Genç Ö** (2008) An Investigation on The Effects of Design and Operational Parameters on Grinding Performance of Multi-Compartment Ball Mills Used in The Cement Industry. *Doktora Tezi*. Hacettepe Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Maden Mühendisliği Bölümü. Cevher hazırlama Anabilim Dalı, Ankara, 301 pp.
- Güler G, Güler E, İpekoğlu Ü ve Mordoğan H** (2005) Uçucu küllerin kullanım alanları; *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET*, İzmir.
- Hacıfazlıoğlu H** (2009) İnce ve Çok İnce Öğütme için Alternatif Değirmen Tiplerinin Tanıtılması. *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1: 17-30.
- Hilden M and Suthers S** (2010) Comparing energy efficiency of multi pass high pressure grinding roll (HPGR) circuits. In: *XXV International Mineral Processing Congress (IMPC) 2010 Proceedings*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, 801-811.
- Hoşten Ç ve Fidan B** (2012) An industrial comparative study of cement clinker grinding systems regarding the specific energy consumption and cement properties. *Powder Technology*, 221: 183-188.
- Hyeong K K** (2015) Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability. *Construction and Building Materials*, 91: 57-64.
- IsaMill** (2008) *Wikivand*. Adres: <https://www.wikiwand.com/en/IsaMill>.
- Jankovic A** (2000) Fine grinding in Australian minerals industry. *Journal of Mining and Metallurgy*, 36: 51-61.
- Jankovic A** (2003) Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*, 16: 337-345.
- Jankovic A, Suthers S, Wills T and Valery W** (2015) Evaluation of dry grinding using HPGR in closed circuit with an air Classifier. *Minerals Engineering*, 71: 133-138.
- Jaturapitakkul C and Cheerarot R** (2003) Development of Bottom Ash as Pozzolan Material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1) : 48-53.
- Katırcıoğlu D** (2010) Niğde Bölgesindeki Kalsitin Karıştırılmalı Bilyeli Değirmende Yaş Öğütülmesi ve Bazı İşlem Parametrelerinin Ürün İnceliğine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde, 79 s.
- Kızgut S, Cuhadaroğlu D ve Samanlı S** (2010) Stirred Grinding of Coal Bottom Ash to Be Evaluated as a Cement Additive. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(16): 1529-1539.
- Korkmaz A V** (2019) Çimento Üretiminde Kil Ham Maddesine Alternatif Olarak Çamurtaşının Kullanılabilirliği. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 58(1): 7-15.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kula İ, Olgun A, Erdogan Y and Sevinc V** (2001) Effects of colemanite waste. cool bottom ash. and fly ash on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 31(3): 491-494.
- Kurada R, Silvestre J D, Brito J and Ahmed H** (2017) Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. *Journal of Cleaner Production*, 166: 485-502.
- Kwade A, Blecher L and Schwedes J** (1996) Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill Part 2: Stress intensity and its effect on comminution. *Powder Technology*, 86: 69-76.
- Kwade A** (1999) Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and its Practical Application. *Powder Technology*, 105: 14-20.
- Mankosa M J, Adel G T and Toon R H** (1986) Effect of Media Size in Stirred Ball Mill Grinding of Coal. *Powder Technology*, 49: 75-82.
- MEB** (2012) *Google*. Adres : [https://www.megep.meb.gov.tr/mte/modul.Özgül Yüzey Tayini.pdf](https://www.megep.meb.gov.tr/mte/modul.Özgül%20Yüzey%20Tayini.pdf).
- METSO Stirred Milling machine development and application extension.** (13.11.2013) *Google*, Adres:<https://www.directindustry.com/prod/metso-corporation/9344.html>.
- Nappier-Munn T J (Ed.), Morrel S, Morrison R D and Kojovic T** (1996) *Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation*. 2. baskı. ISBN : 064628861X, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Queensland, 413 pp.
- Neikov O D** (2019) Mechanical Crushing and Grinding, *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders*, Neikov O D, Naboychenko S S, Murashova I V, Gopienko V G Frishberg I V and Lotsko D V (Eds.), ISBN: 978-1-85617-422-0 Frantsevich Institute for Problems of Materials Science (IPMS), Kiev (e-book), 65-88.
- NTPC Fly Ash For Cement Concrete** (2011) *Google*. Adres : <https://www.ntpc.co.in/ash-download/1674/0/fly-ash-cement-concrete%E2%80%93resource-high-strength-and-durability-structure-lower-cost>.
- Outotech HIGmill – energy-efficient high-intensity Grinding.** (t.y.) *Google*. Adres : https://Www.Stmminerals.Com/Files/1596528943_Higmill_Brochure_2019.Pdf.
- Özdağ H** (1992) *Cevher Hazırlama-I*. Anadolu Üniversitesi. Müh.-Mim. Fak. Yayım. No: 107. Eskişehir, 151 s.
- Priyardashini P, Mohan G G and Santhi A S** (2011) A review on the utilization of bottom ash. *Proceedings of International Conference on Materials for Future (ICMF)*, Government Engineering College, 23 rd. February, Thrissur, India, 123-129.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Pilevneli** (2003) Bilyalı Bir Karıştırılmalı Değirmende İnce Boyutlu Klinker Öğütmesinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 159 s.
- Saklara S, Bayraktar İ ve Öner M** (2000) İnce tane boyu analizinde kullanılan yöntemler. *Madencilik Dergisi*, 39(2): 29-47.
- Samanlı S** (2008) Zonguldak- Çatalağzı termik santrali katı fosil yakıtı öğütme kinetiğinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 177 s.
- Sert M Y and Yurteri C** (1990) Kömür Yakıtlı Termik Santrallerde Başlıca Çevre Sorunları ve Önlemler. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 376: 267-268.
- Sinnot M, Cleary 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.
- Stehr N** (1988) Recent development in stirred ball milling. *International Journal of Mineral Processing*, 22: 431-444.
- Toraman Ö Y** (2015) Karıştırılmalı bilyalı değirmende çok ince yaş öğütme: Bölüm 1. Öğütme mekanizması ve proses parametreleri. *Madencilik*, 54(1): 13-24.
- TS EN 197-1** (2002) *Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim. Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Türk Standardları Enstitüsü.
- URL-1** <https://safgumuscubuk.com>>. Ziyaret tarihi: 16.06.2020.
- URL-2** <https://www.enerjiatlası.com/komur/> Ziyaret tarihi: 04.07.2021.
- Wills B A** (1997) *Mineral Processing Thechnology*. 6. Baskı, ISBN 10 : 0750628383, Butterworth-Heinemann, Oxford. Sayfa sayısı, 443 pp.
- Yeğinoğlu A** (2003) Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkıları. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426(4): 56 -61.
- Yıldız N** (2007) *Cevher Hazırlama*. Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 6. baskı. ISBN : 9789759677916. Ankara. 504 s.
- Yokoyama T and Inoue Y** (2007) Selection of Fine Grinding Mills. *Handbook of Powder Technology, Particle Breakage Volume 12 Chapter 10*, 1(9): 487-508.
- Yüksek S ve Kaya S** (2017) Kömür Baca Külü, Kireç ve Jips Ürünlerinden Yapı Malzemesi Yapımı. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(3): 58-70.



BİBLİYOGRAFYA

BP (2017) Full report - Statistical review of world energy, 49 pp.

Elhasia T, Noche B and Zhao L (2013) Simulation of a sustainable cement supply chain; proposal model review, World Academy of Science. *Engineering and Technology*, 75: 470-478.

Ergin H (1999) *Boyut Küçültme teknolojisi. Çimento Öğütme Devrelerinin Modelleme ve Simülasyonlu Optimizasyonu*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Endüstri-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporu (ÜNİPR 96/09), 113 s.

Fadhel H and Frances C (2001) Wet batch grinding of alümina in a stirred bead mill. *Powder Technology*, 119:257-268.

Gao M and Forsberg E (1993) A study on the effect of parameters in stirred ball milling. *International Journal of Mineral Processing*, 37: 45-49.

Harder J (2003) Advanced grinding in the cement industry. *ZKG International*, 56(3): 31-42.

İpekoğlu Ü ve Tanrıverdi M (2002) *Cevher Hazırlama*. 4. Baskı. Dokuz Eylül Üniversitesi Baskı Ünitesi, İzmir, 215 s.

Kwade A (1999) Wet Comminution in Stirred Media Mills-Research and its Practical Application. *Powder Technology*, 105: 14-20.

Hyeong K K and Lee H K (2011) Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (11):15 - 22.

Klymowsky R, Patzelt N, Knecht J and Burchardt E (2002) Selection and sizing of high pressure grinding rolls. *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceedings*, Mular A L, Halbe D N and Barratt. D J (Eds.), 636-668.

Kula İ, Olgun A, Sevinc V and Erdogan Y (2002) An investigation on the use of tincal ore waste, fly ash and coal bottom ash as Portland cement replacement materials. *Cement and Concrete Resources*, 32:227–232.

Mankosa M J, Adel G T and Yoon R H (1989) Effect of operating parameters in stirred ball mill grinding of coal. *Powder Technology*, 59: 255-260.

Miranda S and Yaeger S (1998) Homing on the best size reduction method. *Chemical Engineering*, 105: 102-110.

Orumwense O A (1992) The kinetics of fine grinding in an annular ball mill. *Powder Technology*, 73: 101-108.

BİBLİYOGRAFYA (devam ediyor)

- Önal G ve Ateşok G** (1994) *Cevher Hazırlama El Kitabı*. I. Baskı. ISBN : 9789757946007. Yurt Madencilğini Geliştirme Vakfı, İstanbul, 511 s.
- Sinnot M, Cleary 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.
- Smith J V** (1974) *Feldspar Minerals. Volume 1*. Crystal Structure and Physical Properties. Casey R and Rawson P F (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 627 pp.
- Tüzün M A** (1994) A study of comminution in a verticle stirred ball mill. *Doktora Tezi*. University of Natal, Chemical Engineering Department, Natal, 244 pp.
- Uson A A, Sabiron L A M, Ferrira G and Sastresa E L** (2013) Uses of Alternative Fuels and Raw Matereials in The Cement İndustry as Sustainable Waste Management Options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23: 242-260.
- Vargas J and Halog A** (2015) Effective carbon emission reductions from using upgraded fly ash in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 103:948–959.
- Walker W H, Lewis W K, McAdams W H and Gilliland E R** (Eds.) (1937) *Principles of Chemical Engineering*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 255 pp.
- Wang Y and Forsberg E** (2000) Product size distribution in stirred media mills. *Minerals Engineering*, 13: 459-465.
- Young M F and Gao M** (2000) Performance of the IsaMills in the George Fisher Flowsheet. *Proceedings of AusIMM Seventh Mill Operators' Conference*, 12-14 October Kalgorlie, Western Australia, 75-81.
- Yıldız N** (1999) *Öğütme Teorisi, Uygulaması Değirmenler ve Sınıflandırıcılar*, ISBN: 975-9677-0-3, Kozan Ofset Matbacılık, Ankara, 217 pp.
- Wills B A** (1985) *Mineral Processing Technology* 3rd Ed. Pergamon. Oxford in Great Britain. 630 pp.
- Zheng J, Haris C C and Samasundaran P** (1996) A study on grinding and energy input in stirred media mills. *Powder Technology*, 86(2): 171-178.

ÖZGEÇMİŞ

Barış AKKAYA, İlk öğrenimine Aydında başladı. İlk iki yılı burada tamamladıktan sonra geri kalan ilk öğrenimini İzmir’ de Sarıkamış İlkokulu, orta öğrenimini Hacı Şakir Eczacıbaşı Orta Okulu ve İzmir Karataş Lisesinde tamamlamıştır. 1995 yılında İzmir’ de Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümünde lisans eğitime başlamış ve 1999 yılında mezun olmuştur. Bu tarihten itibaren askerlik ve özel sektörde çalışma faaliyetlerini gerçekleştirdiği 10 yıllık bir dönemin ardından 2009 yılında o zamanki adı Zonguldak Karaelmas Üniversitesinde, Maden Mühendisliği Bölümü Cevher Hazırlama Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve atanmıştır. 2013 yılında aynı okulda Fen Bilimleri enstitüsünden yüksek lisans derecesini almış ve halen Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır. Barış Akkaya evli ve bir çocuk babasıdır.