

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİMENTO HAMMADDELERİNİN ÖĞÜTÜLMESİNDE
ENERJİ OPTİMİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Maden Müh. Fırat KARAKAŞ
(505041103)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 8 Mayıs 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2006**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Güven ÖNAL
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Şafak ÖZKAN (İ.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. A.Ekrem YÜCE (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın ortaya çıkması, gelişmesi ve sonuçlandırılması aşamalarında bana bilgi ve tecrübesinden yararlanma fırsatını veren, yapmış olduğu uyarı, öneri ve yönlendirmeleriyle, gerek bu çalışmamda gerekse yaşamımdaki diğer adımlarımda bana yardımcı olan, sayın hocam Prof.Dr. Güven ÖNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Cevher Hazırlama teknolojisini bana sevdiren ve kendisini örnek almamı sağlayarak beni uzun ve zahmetli bir “akademik” yola sokan, değerli hocam Yrd.Doç.Dr. A.Ekrem Yüce'ye, bu çalışmamda da beni yalnız bırakmadığı için teşekkürü bir borç biliyorum.

Çalışmalarımda bana yardımcı olan tüm Cevher ve Kömür Hazırlama Ana Bilim dalı elemanlarına da teşekkür ediyorum.

Ayrıca, bu çalışmayı “İz Bırakanlar” bursu çerçevesinde destekleyen, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne de teşekkür ederim.

Son olarak, desteklerini her zaman hissettiğim aileme ve dostlarıma teşekkür ediyorum.

Haziran-2006

Fırat KARAKAŞ

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
2. ÇİMENTO VE ÇİMENTO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ	5
2.1. Çimentonun Tanımı ve Gelişimi	5
2.2. Çimento Hammaddeleri	7
2.2.1. Ana Hammaddeler	7
2.2.2. Katkı Maddeleri	8
2.3. Enerji Tüketimi	10
2.4. Çimento Üretimi Sırasındaki Emisyonlar	10
2.5. Çimento Üretim Teknolojisi	11
3. ÖĞÜTME VE ÇİMENTODA ÖĞÜTME	14
3.1. Öğütme	14
3.1.1. Kuru ve Yaş Öğütme	14
3.2. Bilyalı Değirmenler	16
3.2.1. Bilyalı-Aktarmalı Değirmenler	16
3.3. Çimento Üretim Sürecinde Kullanılan Değirmenler	18
3.3.1. Bilyalı Değirmenler	18
3.3.2. Dikey Rulolu Tip Değirmenler	20
3.3.3. Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen (Horomill)	23
3.4. Öğütmede Enerji Sarfıyatı	24
3.4.1. Enerji Sarfıyatını Etkileyen Parametreler	24
3.4.2. Enerji Teorileri	26
3.4.2.1. Rittinger Teorisi	26
3.4.2.2. Kick Teorisi	27
3.4.2.3. Bond Teorisi	27
3.4.2.4. Holmes Teorisi	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	30
4.1. Malzeme ve Yöntem	30
4.1.1. Deneylerde Kullanılan Aygıtlar	30
4.1.2. Yöntem	30
4.1.3. Hammadde Öğütme Deneyleri	31
4.1.3.1. Standart Bon İş İndeksi Deneyleri	32
4.1.3.2. Besleme Boyutunun Etkisi	37
4.1.3.3. Bilya Yüklemesinin Etkisi	37
4.1.3.4. Bilya Kompozisyonunun Etkisi	38
4.1.4. Çimento Öğütme Kademesi	39
4.1.4.1. Bond İş İndeksi Deneyleri	40
4.1.4.2. Laboratuvar Tipi Bilyalı Aktarmalı Değirmen Deneyleri	43

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR	49
KAYNAKLAR	51
EKLER	54
ÖZGEÇMİŞ	97

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1. İlk Sıralardaki Ülkelerin ve Dünya Genelinin Yıllara Göre Çimento Üretimi	6
Tablo 2.2. İlk Sıralardaki Ülkelerin ve Dünya Genelinin Yıllara Göre Çimento Tüketimi.....	7
Tablo 2.3. Çimento Üretim Prosesinde Kullanılan Enerji Hammaddelerinin Kullanım Oranları.....	10
Tablo 2.4. Çimento Fabrikası Ekzost Gazı İçeriği.....	11
Tablo 3.1. Bilyalı Değirmen Kapasitesine Etki Eden Faktörler.....	17
Tablo 3.2. Bilyalı ve Dikey Değirmenlerin Enerji Sarfı ve Aşınma Parametrelerine Göre Karşılaştırılması	22
Tablo 4.1. YSM ve DSM Kimyasal Analiz Sonuçları.....	32
Tablo 4.2. Standart Bond Değirmeninde Kullanılan Bilya Miktarı ve Boyutu.....	33
Tablo 4.3. YSM Bond Deneyi Tablosu.....	35
Tablo 4.4. DSM Bond Deneyi Tablosu.....	36
Tablo 4.5. YSM ve DSM Bond İş İndeksleri.....	36
Tablo 4.6. Farklı Besleme Boyutlarındaki Öğütme Deneylerinin Sonuçları.....	37
Tablo 4.7. Farklı Bilya Yüklemelerindeki Öğütme Deneylerinin Sonuçları.....	38
Tablo 4.8. 105 Mikron Altı Hedefine Göre Farklı Bilya Yüklemelerindeki Öğütme Deneylerinin Sonuçları.....	38
Tablo 4.9. Farklı Bilya Kompozisyonlarında Yapılan Öğütme Deneylerinin Sonuçları.....	39
Tablo 4.10. Kireçtaşı ve Klinker'in Bond Deneyi Tabloları.....	40
Tablo 4.11. Curuf ve Tras'ın Bond Deneyi Tabloları.....	41
Tablo 4.12. Alçıtaşı ve Karışımın'ın Bond Deneyi Tabloları.....	41
Tablo 4.13. Klinker ve Katkı Malzemelerinin Bulunan İş İndeksleri.....	42
Tablo 4.14. Malzeme Katkı Oranları ve Harcanan Enerji.....	42
Tablo 4.15. Laboratuvar Tipi Bilyalı Öğütme Deneylerinde Sarf Edilen Enerji.....	44
Tablo 4.16. Klinker ve Curuf Karışımı Deneylerinde Sarf Edilen Enerji.....	44
Tablo 4.17. Klinker ve Curuf'un Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başlarına Öğütülmeleri Durumundaki Elek Analizleri.....	45
Tablo 4.18. Tras ve Kireçtaşı'nın Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başlarına Öğütülmeleri Durumundaki Elek Analizleri.....	45

Tablo 4.19.	Alçıtaşı'nın Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başına Öğütülmesi Durumundaki Elek Analizleri.....	46
Tablo 4.20.	%90 Klinker + %10 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu.....	47
Tablo 4.21.	%70 Klinker + %30 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu.....	47
Tablo 4.22.	%50 Klinker + %50 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu.....	48
Tablo A.1.	Bond Deneyine Beslenen YSM'nin Elek Analizi.....	54
Tablo A.2.	Bond Deneyine Beslenen DSM'nin Elek Analizi.....	55
Tablo A.3.	YSM Bond Deneyi Ürün Elek Analizi.....	56
Tablo A.4.	DSM Bond Deneyi Ürün Elek Analizi.....	56
Tablo A.5.	-9 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi....	57
Tablo A.6.	-5,6 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi..	58
Tablo A.7.	-3,36 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi.....	59
Tablo A.8.	-1,68 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi.....	60
Tablo A.9.	-9 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi.....	61
Tablo A.10.	-5,6 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi.	62
Tablo A.11.	-3,36 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi.....	63
Tablo A.12.	-1,68 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi.....	64
Tablo A.13.	Bilya Yükleme Deneyine Beslenen Malzemenin Elek Analizi.....	65
Tablo A.14.	%26 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi....	66
Tablo A.15.	%30 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi....	67
Tablo A.16.	%34 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi....	68
Tablo A.17.	%38 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi....	69
Tablo A.18.	%42 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi....	70
Tablo A.19.	%26 Bilya Yüklemesinde 69 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi.....	71
Tablo A.20.	%30 Bilya Yüklemesinde 60 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi.....	72
Tablo A.21.	%34 Bilya Yüklemesinde 51 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi.....	73
Tablo A.22.	%38 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi.....	74
Tablo A.23.	%42 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi.....	75
Tablo A.24.	Bilya Kompozisyonu Öğütme Deneylerine Beslenen Numunenin Elek Analizi.....	76
Tablo A.25.	Bond Deneyine Beslenen Kireçtaşı Elek Analizi.....	78
Tablo A.26.	Bond Deneyine Beslenen Klinker Elek Analizi.....	79
Tablo A.27.	Bond Deneyi Beslenen Curuf Elek Analizi.....	80
Tablo A.28.	Bond Deneyine Beslenen Tras Elek Analizi.....	81
Tablo A.29.	Bond Deneyine Beslenen Alçıtaşı Elek Analizi.....	82
Tablo A.30.	Bond Deneyine Beslenen Karışım Elek Analizi.	83
Tablo A.31.	Bond Deneyi Ürün Kireçtaşı Elek Analizi.....	84
Tablo A.32.	Bond Deneyi Ürün Klinker Elek Analizi.....	84

Tablo A.33.	Bond Deneyi Ürün Curuf Elek Analizi.....	85
Tablo A.34.	Bond Deneyi Ürün Tras Elek Analizi.....	86
Tablo A.35.	Bond Deneyi Ürün Alçıtaşı Elek Analizi.....	87
Tablo A.36.	Bond Deneyi Ürün Karışım Elek Analizi.....	88
Tablo A.37.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Klinker Ürün Elek Analizi.....	89
Tablo A.38.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Kireçtaşı Ürün Elek Analizi.....	90
Tablo A.39.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Curuf Ürün Elek Analizi.....	91
Tablo A.40.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Tras Ürün Elek Analizi.	92
Tablo A.41.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Alçıtaşı Ürün Elek Analizi.....	93
Tablo A.42.	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Karışım Ürün Elek Analizi.....	93
Tablo A.43.	%90 Klinker+%10 Curuf Ürün Elek Analizi.....	94
Tablo A.44.	%70 Klinker+%30 Curuf Ürün Elek Analizi.....	95
Tablo A.45.	%50 Klinker+%50 Curuf Ürün Elek Analizi.....	95

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1:	Tipik Bir Çimento Tesisinin Genel Akım Şeması..... 13
Şekil 3.1:	Tipik Bir Bilyalı Değirmen İç Yapısı ve Malzeme Akışı..... 19
Şekil 3.2:	Çimento Üretiminde Kullanılan Bilyalı Değirmenin Dış Görünümü..... 19
Şekil 3.3:	Tipik Bir Dikey Rulolu Değirmenin İç Yapısı..... 21
Şekil 3.4:	Dikey Rulolu Değirmenin Dış Görünümü..... 22
Şekil 3.5:	Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen..... 24
Şekil 4.1:	Standart Bond Değirmeni..... 34
Şekil A.1:	YSM Bond Deneyine Beslenen Elek Altı Eğrisi..... 54
Şekil A.2:	DSM Bond Deneyine Beslenen Elek Altı Eğrisi..... 55
Şekil A.3:	YSM Bond Deneyi Ürün Elek Altı Eğrisi..... 56
Şekil A.4:	DSM Bond Deneyi Ürün Elek Altı Eğrisi..... 57
Şekil A.5:	-9 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi... 58
Şekil A.6:	-5,6 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi..... 59
Şekil A.7:	-3,36 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi..... 60
Şekil A.8:	-1,68 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi..... 61
Şekil A.9:	-9 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi..... 62
Şekil A.10:	-5,6 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi..... 63
Şekil A.11:	-3,36 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi..... 64
Şekil A.12:	-1,68 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi..... 65
Şekil A.13:	Bilya Yükleme Deneyine Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi..... 66
Şekil A.14:	%26 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi..... 67
Şekil A.15:	%30 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi..... 68
Şekil A.16:	%34 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi..... 69
Şekil A.17:	%38 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi..... 70
Şekil A.18:	%42 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi..... 71
Şekil A.19:	%26 Bilya Yüklemesinde 69 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Altı Eğrisi..... 72
Şekil A.20:	%30 Bilya Yüklemesinde 60 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Altı Eğrisi..... 73
Şekil A.21:	%34 Bilya Yüklemesinde 51 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Altı Eğrisi..... 74

Şekil A.22:	%38 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Altı Eğrisi.....	75
Şekil A.23:	%42 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Altı Eğrisi.....	76
Şekil A.24:	Bilya Kompozisyonu Deneylerine Beslenen Numunenin Elek Altı Eğrisi.....	77
Şekil A.25:	Farklı Bilya Kompozisyonlarında Yapılan Öğütmeler Sonucu Oluşan Elek Altı Eğrileri.....	77
Şekil A.26:	Bond Deneyine Beslenen Kireçtaşı Elek Altı Eğrisi.....	78
Şekil A.27:	Bond Deneyine Beslenen Klinker Elek Altı Eğrisi.....	79
Şekil A.28:	Bond Deneyine Beslenen Curuf Elek Altı Eğrisi.....	80
Şekil A.29:	Bond Deneyine Beslenen Tras Elek Altı Eğrisi.....	81
Şekil A.30:	Bond Deneyine Beslenen Alçıtaşı Elek Altı Eğrisi.....	82
Şekil A.31:	Bond Deneyine Beslenen Karışım Elek Altı Eğrisi.....	83
Şekil A.32:	Bond Deneyi Ürün Kireçtaşı Elek Altı Eğrisi.....	84
Şekil A.33:	Bond Deneyi Ürün Klinker Elek Altı Eğrisi.....	85
Şekil A.34:	Bond Deneyi Ürün Curuf Elek Altı Eğrisi.....	86
Şekil A.35:	Bond Deneyi Ürün Tras Elek Altı Eğrisi.....	87
Şekil A.36:	Bond Deneyi Ürün Alçıtaşı Elek Altı Eğrisi.....	88
Şekil A.37:	Bond Deneyi Ürün Karışım Altı Eğrisi.....	89
Şekil A.38:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Klinker Ürün Elek Altı Eğrisi.....	90
Şekil A.39:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Kireçtaşı Ürün Elek Altı Eğrisi.....	91
Şekil A.40:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi.....	92
Şekil A.41:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Tras Ürün Elek Altı Eğrisi.....	92
Şekil A.42:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Alçıtaşı Ürün Elek Altı Eğrisi.....	93
Şekil A.43:	Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Karışım Ürün Elek Altı Eğrisi.....	94
Şekil A.44:	%90 Klinker+%10 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi.....	94
Şekil A.45:	%70 Klinker+%30 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi.....	95
Şekil A.46:	%50 Klinker+%50 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi.....	96

ÇİMENTO HAMMADDELERİNİN ÖĞÜTÜLMESİNDE ENERJİ OPTİMİZASYONU

ÖZET

Bu tez kapsamında, çimento üretim süreci ve özellikle öğütme kademesi incelenmiş, yapılan literatür çalışmalarından sonra öğütme kademesinde gerçekleştirilebilecek bazı değişimlerin, sarf edilen enerji üzerindeki etkileri araştırılmış ve söz konusu öğütme işlemleri için optimum koşullara ulaşılmaya çalışılmıştır.

Literatür çalışmasında çimento kavramı ve üretim süreci hakkında bir takım bilgiler derlenmiş ayrıca öğütme hakkında, deneysel çalışmalara yol gösterecek bilgiler değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, konu ile ilgili çeşitli araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalar hakkında da kısa bilgiler sunulmuştur.

Deneysel çalışmalar 2 farklı öğütme kademesi göz önüne alınarak, 3 farklı aşamada yapılmıştır. 1.kademe öğütme, çimentonun ana hammaddesini oluşturan kireçtaşı, kil ve marn'ın yaklaşık -90 mikron boyutuna öğütülmesidir. Çalışmada iki tip “Marn” kullanılmıştır. Bu kademe besleme boyutunun, bilya yüklemesinin ve kompozisyonunun enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. “Standart Bond Değirmeninde” -9 mm, -5,6 mm, -3,36 ve -1,68 mm besleme boyutlarında yapılan deneyler sonucunda, standart Bond değirmeni için optimum besleme boyutunun -3,36 mm olduğu saptanmıştır. Ayrıca yine aynı değirmende, değirmen iç hacmine göre, %26, %30, %34, %38 ve %42'lik bilya yüklemelerinin, enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri araştırılmış ve en uygun yüklemenin %38 olduğu saptanmıştır. Son olarak bilya kompozisyonunun değişmesi durumunda öğütmede ve sarf edilecek enerjideki değişimleri saptayabilmek için 7 farklı bilya kompozisyonu oluşturulmuş ve her bir kompozisyonla, %38 bilya yüklemesi ve -3,36 mm besleme boyutu sabit kalacak şekilde deneyler yapılmıştır.

2. kademe öğütmede ise (çimento öğütme) “kompoze çimento” karışımı esas alınarak öncelikle klinkerin ve katkı maddelerinin (Curuf+Tras+Kireçtaşı+Alçıtaşı) ayrı ayrı Bond iş indeksleri bulunmuş daha sonra karışım çimentonun Bond iş indeksi bulunarak klinker ve katkı maddelerinin ayrı ayrı ve beraber öğütülmeleri durumunda sarf edilecek enerjiler karşılaştırılmıştır. Karışımın Bond iş indeksi 13,59 kWh/t olarak bulunmuştur. Klinker’in ve katkı maddelerinin ayrı ayrı bulunan iş indeksleri ve karışım içerisindeki oranları dikkate alınarak karışımın, bir de aritmetik olarak iş indeksi hesaplanmıştır. Bulunan iş indeksi değeri 14,90 kWh/t’dur. Sonuç olarak birlikte öğütmenin, ayrı ayrı öğütmeye göre daha az enerji sarfı gerektirdiği görülmüştür.

Klinker ve curuf’un tek başlarına öğütülmesiyle birden çok malzemeye beraber öğütülmeleri sonucunda elde edilen elek altı eğrilerinde büyük bir farklılık görülmemiştir. Tras, kireçtaşı ve alçıtaşı ise tek başlarına ve beraber öğütülmeleri sonucunda, aynı boyut gruplarında farklı oranlarda bulundukları tespit edilmiştir. Bu üç malzeme de beraber öğütülme durumunda, tek başlarına öğütülme durumlarına göre daha küçük boyutlarda yoğunlaşma eğilimi göstermektedir. Son olarak, çimentonun bileşiminde oransal olarak miktarı en çok olan klinker ve öğünebilme özelliği açısından klinkerle büyük farklılığa sahip olan curuf, %90-10, %70-30 ve %50-50 oranlarında karıştırılarak öğütme deneyleri yapılmıştır. 1. oranda harcanan enerji 9,32 kWh/t, 2.oranda 9,6 kWh/t ve 3.oranda ise 9,81 kWh/t olarak bulunmuştur.

Yapılan deneyler sonucunda, bilya yükü %38-40’a yükseltildiğinde, öğütmede kullanılan enerjide önemli bir tasarrufun sağlanacağı ortaya konulmuştur.

ENERGY OPTIMIZATION FOR GRINDING OF CEMENT RAW MATERIALS

SUMMARY

In this thesis, cement production process, especially grinding stage of the process was investigated. Firstly, the literature surveys were completed and then some improvements made for grinding stage and their effects at the stages were investigated. At this point, optimum operating parameters were found. Information with respect to cement definition and production processes were compiled. Besides some information about grinding was also compiled. Last step of the literature survey consists of previous investigations related to this thesis.

Considering two different stages of cement grinding, experimental studies were done at three different steps. Grinding of limestone, clay and marl which are the main components of the cement to approximately -90 micron is the first stage of the cement grinding. In this step, two types of marl were used. At this stage, effects of feed size, ball charge and ball composition were searched. Optimum feed size for standard bond mill was found as -3,36 mm, result of experiments done in 4 different feed sizes; -9 mm, -5,6 mm, -3,36, -1,68 mm. Moreover, five different ball charges were selected as %26, %30, %34, %38 and %42 considering mill's internal volume and optimum ball charge was found as %38 according to energy consumptions and size reduction ratios. The last experiment at this stage is about ball composition. 7 different ball composition were created and experiments were done for all composition at steady conditions (5 minutes and %38 ball charge).

At the second stage of this work, clinker's and additives' (slag, trass, limestone and gypsum) bond work index were found separately. After that, composite cement was formed with clinker and additives and this mixture's bond work index was also determined, so that separate grinding and grinding of mixture were compared.

Mixture's bond work index was found as 13,59 kWh/t. The arithmetic mean of components' bond work index values is 14,90 kWh/t. As a result of this investigation, it is stated that grinding as mixture of cement give better results than separate grinding.

There is no considerable difference between separate grinding and mixture grinding for clinker and slag. However, in the mix form, trass, limestone and gypsum were concentrated smaller size groups than separate grinding. Clinker and slag have very different grinding characteristics. Because of understanding their behaviour in the mixture, they were mixed at ratios as %90-%10, %70-%30, %50-%50 and ground at the same conditions. Consumed energies were found as 9,32 kWh/t, 9,6 kWh/t and 9,81 kWh/t respectively.

As a result of the experiments, consumed energy at the grinding will be saved if mills with %38-40 ball charge are used in the grinding of cement.

1. GİRİŞ

Çimento insanoğlunun çok eski zamanlardan beri kullandığı ve zaman içerisinde önemini hiç kaybetmeden, devamlı olarak geliştirilen en önemli yapı malzemesidir. Günümüzde çimento yerine geçebilecek bir malzeme bulunmamaktadır. Çimento teknolojisi devamlı bir araştırma konusudur. Çimento üretim sürecinin zenginliği, karmaşıklığı ve yeniliklere açıklığı bu durumun doğal sebeplerini oluşturan unsurlardır. Özellikle cevher hazırlama teknolojisinde ve daha bir çok alanda en önemli araştırma konularından olan “öğütme”, çimento üretim sürecinde de etkin bir role sahiptir.

Bu araştırmanın amacı, çimento üretim sürecinde enerji sarfında üst düzeyde yer alan öğütme kademelerinde yapılacak iyileştirmeler ve yenilikler sonucunda, enerji sarfını azaltmaktır. Bunun için hem hammadde öğütme (farin) hem de çimento öğütme kademesinde çeşitli unsurlar incelenmiştir. Özellikle çimento sektöründe yaygın olarak kullanılan %25-32 gibi düşük bilya yükleme oranlarının yerine kullanılacak, daha büyük bilya yükleme oranlarının boyut küçültme oranları ve enerji sarfıyatı üzerindeki etkileri saptanmaya çalışılmıştır. Bundan başka hammaddelerin ayrı ayrı veya beraber öğütülmeleri durumundaki davranışları saptanmıştır.

Konuyla ilgili Hoşten, C., ve Avşar, C’nin yapmış olduğu bir çalışmada, klinker ve tras’ın ayrı ayrı ve beraber olmaları durumunda öğünebilirlikleri araştırılmıştır. Buna göre klinker’in Bond iş indeksi 13,49 kWh/st , tras’ın ise 11,65 kWh/st olarak bulunmuştur. %80 klinker+%20 tras karışımının Bond iş indeksi 14,79 kWh/st; %65 klinker+%35 tras karışımının Bond iş indeksi ise 14,31 kWh/st olarak bulunmuş. Karışımların hesaben bulunan Bond iş indeksleri ise sırasıyla 13,12 kWh/st ve 12,85 kWh/st’dur.

Bu verilere göre karışım halinde olan malzemenin aritmetik olarak hesaplanan iş indeksiyle, fiili iş indeksi arasında fark olduğu; ayrı ayrı öğütmenin karışım halinde öğütmeye oranla daha az enerji sarf ettiği; karışımın, tek başına klinkerden daha fazla enerji sarf edeceği yorumları yapılmıştır [1].

Deniz, V'nin yapmış olduğu çalışmada ise bilya yüklemesinin ve besleme boyutunun özgül kırılma oranı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kireçtaşı, tras ve klinker numuneleri kademeli olarak öğütülmüştür. Özgül kırılma oranı (S_1), farklı öğütme süreleri sonucunda elde edilen elek analizlerinden bulunmuştur. Bulunan iş indeksleri kireçtaşı için 13,52 kWh/t, tras için 7,85 kWh/t ve klinker için 13,69 kWh/t'dur. Çalışmada besleme boyutunun ve bilya yüklemesinin kırılma oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır [2].

Bouzoubal, N ve arkadaşlarının yapmış olduğu araştırmada ise bir tip klinker ve 3 farklı tip uçucu kül kullanılarak, 2,4,6,8 ve 10 saatlik öğütme deneyleri yapılmıştır. Öğütme süresinin artmasıyla beraber malzemelerin boyutları küçülmüş dolayısıyla özgül yüzey alanları artmıştır. Ancak bu artışın ilk iki saat içinde etkisi olduğu bulunmuştur. Bu süreden sonra, özgül yüzey alanı artış hızı yavaşlamış ve öğütme verimliliğinin düştüğü görülmüştür. Uçucu külün biçimi ve yapısı öğütme ile değişmektedir. Büyük ve şekilsiz tanelerin çoğu 2 saatlik öğütmeden sonra kırılmış ve değişime uğramıştır. Bununla beraber, öğütme süresinin artması küresel tane oranını azaltmaktadır. Uçucu küllerin dayanımları öğütme süresiyle doğru orantılı olarak artış eğilimi göstermektedir. Optimum öğütme süresi 4 saat olarak bulunmuştur [3].

Deniz, V, değirmen hızının öğütmeye etkisini incelemiştir. Kireçtaşı'nın iş indeksi 13,52 kWh/t ve klinker'in 13,69 olarak bulunmuştur. Malzemelerin iş indeksleri yakın olsa da kırılma fonksiyonlarının farklı olduğu saptanmıştır. Çalışmada 1,2,4,8,12,16 ve 18'er dakikalık öğütmeler yapılmıştır. Değirmen hızı ise kritik hızın %55, %65, %75, %85 ve %95'i olarak seçilmiştir. Optimum öğütmenin, kritik hızın %85'inde gerçekleştiği saptanmıştır [4].

Kimyasal bileşimin öğütmede sarf edilen enerji üzerindeki etkisini araştıran Tokyay, M'nin çalışmasında ise, 15 farklı tip klinker kullanılmıştır. Buna göre; Al_2O_3 oranının artması öğütme enerjisinde düşüşe sebep olmaktadır. Serbest kireç oranı ile öğütmede harcanan enerji arasında logaritmik bir ilişkinin olduğu görülmüş ve serbest kireç oranının artmasıyla harcanan enerjinin de arttığı saptanmıştır. Özgül yüzey alanı ile öğütmede harcanan enerji arasında doğru orantılı bir ilişki vardır. Sıvı

fazın artması harcanan enerjide bir azalmaya yol açar. Ayrıca
$$\frac{C_3S + C_2S}{C_3A + C_3AF}$$

oranının artması enerji sarfiyatını da artırır. Bununla beraber oranın 4 den büyük olduğu durumlarda, sarf edilen enerjide hemen hemen hiç bir değişikliğin olmadığı saptanmıştır. Oranın, 4'den küçük olduğu zamanlarda ise sarf edilen enerji ile parabolik bir ilişki içerisinde olduğu görülmüştür. Optimum oran, 3,79 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak kimyasal bileşim üzerinde fırın beslemesinde yapılacak uygun bir ayarlamamanın, öğütmede sarf edilecek enerjiyi azaltabileceği görülmüştür [5].

Schnatz, R'nin çalışmasında ise, değirmen boy-çap oranının ve bilya yüklemesinin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Buna göre 1,75, 2,1, 2,79, 3,49 şeklinde 4 farklı boy/çap oranı ve %15, %20, %25 şeklinde 3 farklı bilya yüklemesi kullanılmıştır. Optimum boy/çap oranı ve bilya yüklemesinin besleme boyutuna bağlı olarak değiştiği saptanmıştır. Küçük boyutlu bilyalar daha az enerji sarfına sebep olmaktadır. Değirmende kalış süresinin yalnızca besleme ve ürün boyutlarına bağlı olmadığı aynı zamanda bilya yüklemesi ve değirmen boy çap oranının da etkili olduğu belirtilmektedir [6].

Öner M'nin yapmış olduğu çalışmada, 2 farklı curuf ve bir klinker kullanılarak malzemelerin öğünebilirlikleri üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Malzemelerin ayrı ayrı ve çeşitli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen karışımların iş indeksleri standart Bond deneyi esas alınarak bulunmuştur. Buna göre klinker ve curufun öğünebilirliklerinin önemli ölçüde farklılık gösterdiği, öğütme kinetiği açısından, iri boyutlarda curufun klinkere göre daha hızlı kırıldığı, ince boyutlarda ise; (-0,7 ve -1 mm) durumun tersine döndüğü saptanmıştır. Çalışmadan, birlikte öğütmenin ayrı ayrı öğütmeye göre daha fazla enerji sarfına sebep olduğu dolayısıyla ayrı ayrı öğütmenin avantajlı olduğu sonucu çıkartılmıştır [7].

García, I.J ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise, kimyasal yapıları aynı ama farklı yerlerden alınmış ve dolayısıyla farklı oluşum koşullarına (yaş vs.) sahip 2 adet alçıtaşı numunesi kullanılmıştır. Sonuç olarak bu iki alçıtaşının kullanılmasıyla harcanan enerjiler arasında %15'e varan farkların olduğu gözlemlenmiştir. 2 nolu alçıtaşının eklenmesi 1 noludan daha fazla enerji tüketimine yol açmaktadır. Bununla beraber 2 nolu alçıtaşının iş indeksi daha düşüktür. Alçıtaşı numuneleri arasındaki yapısal farklılık, öğütme esnasında da farklı davranışlara yol açmaktadır. Endüstriyel ölçekte klinkerin ve alçıtaşının beraber öğütüldüğü durumda, 100 mikronluk tane boyutunu esas alan iş indeksi tek başına, öğütmeyi karakterize etmek için yeterli

değildir. Bunun nedeni endüstriyel ölçekte %70 3-30 mikron olan tane boyutuna ulaşıldığı halde, iş indeksini belirleme yönteminde herhangi bir film etkisinin meydana gelmemesidir. Bu çalışma yalnızca kimyasal analizin, hammaddelerin öğütmede nasıl davranacaklarını açıklamada yetersiz kaldığını göstermiştir. Bu yüzden ince kesit çalışmaları için ışık mikroskobunun kullanımının yararlı olacağı saptanmıştır [8].

Tsivilis, S ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada 4 adet klinker/kireçtaşı karışım numunesi kullanılmıştır. Karışım içerisindeki kireçtaşı oranları % 10-20-30-40 'dır. Bu 4 numune 4 farklı inceliğe öğütülmüştür. Her bir her bir boyut grubundaki kireçtaşı miktarı saptanmış ve daha sonra klinker ve kireçtaşının boyut dağılımları hesaplanmıştır. Karışımda kolay öğünen kireçtaşının varlığı, daha geniş bir boyut dağılımı oluşturmaktadır. Bununla beraber kireçtaşı miktarca daha küçük boyutlarda yoğunlaşırken (<8 mikron) klinker nispeten iri boyutlarda yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak %30'un üzerindeki kireçtaşı varlığı, hem klinkerin hem de kireçtaşının öğünmesini zorlaştırmaktadır. Klinkerin boyut dağılımının, karışımın boyut dağılımından çok farklı olduğu görülmüştür. Şekil 1'e göre ilk beslemede %20 kireçtaşı ve %80 klinker olduğu halde, -4 mikron boyutunda kireçtaşı oranı % 24,8 iken, klinker oranı % 75,2'dir. Diğer taraftan +56 mikron boyutunda ise kireçtaşı oranı yalnızca %12'dir. %40'lık kireçtaşı ilaveli numune, %30'luk kireçtaşı ilavesine göre öğünme sonucunda, kireçtaşı ve klinkerin daha iri boyutlarda kalmasını sağlamaktadır. Karışımın kolay öğünen kireçtaşının varlığı, karışımın daha geniş bir boyut dağılımına sahip olmasını sağlamaktadır [9].

Bu tez kapsamında yapılan hammadde öğütme deneyleri, besleme boyutu, bilya yüklemesi ve kompozisyonunu optimize etme amaçlı yapılmış, çimento değirmenlerinin tek bölmeli olması durumunda ve halihazırda kullanılan bilya yüklemesinden daha fazla bilya yüklemesi yapılması durumunda elde edilebilecek enerji tasarrufu araştırılmıştır. Çimento öğütme kademesinde ise, malzemelerin ayrı ayrı veya beraber öğütülmeleri durumunda elde edilen sonuçlar, sarf edilen enerjilerin göz önünde bulundurulması suretiyle karşılaştırılmıştır.

Bu tez giriş, çimento ve çimento üretim teknolojisi, öğütme ve çimento üretiminde öğütme kademeleri, deneysel çalışmalar ve sonuçlar bölümleri olmak üzere toplam 5 bölümden oluşmaktadır.

2. ÇİMENTO VE ÇİMENTO ÜRETİM TEKNOLOJİSİ

2.1. Çimentonun Tanımı ve Gelişimi

Çimento, genel olarak hidrolik bir bağlayıcı olarak tarif edilebilir. Çimento kelimesinin kökeni Latince'dir. Coemetum olan Latince kelime, farklı dillere farklı şekilde uyarlanmıştır. Çimentonun kullanımı MÖ 2000'li yıllara kadar uzanmaktadır. Eski Mısırlıların doğal puzzolanik maddelerle kireci karıştırarak harç yaptıkları bilinmektedir [10].

Bununla beraber, yapılan araştırmalar sonucu hidrolik bağlayıcılara ait en eski kalıntıların Roma, Girit ve Yunan devirlerine ait oldukları saptanmıştır. O devirlerden günümüze kadar ulaşmış yapılara örnek olarak, Roma'daki Pantheon ve Colosseum, Napoli sahillerindeki beton duvarlar ve Fransa Nîmes'deki Pont-du Gar verilebilir. Bu dönemlerde söndürülmüş kirecin, kırmataşların ve çeşitli puzzolonik maddelerin su ile karıştırılarak sağlam bir yapı malzemesinin oluşturulmuş olduğu görülmektedir. Ne var ki ortaçağda diğer pek çok alanda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılar konusunda da bir duraklama dönemi olmuştur. 18. yy'da sebebi anlaşılamamış olmasına rağmen, kirecin su altında sertleştiği görülmüş, 1756 yılında John Smeathon adlı mühendis almış olduğu bir deniz feneri projesi için, tuzlu ve tatlı sularda erimeyecek bir bağlayıcı geliştirebilme amaçlı yapmış olduğu deneyler sonucunda, saf olmayan, bir miktar kil içeren kireçlerin en iyi sonucu verdiğini gözlemlemiştir. Daha sonra çeşitli araştırmacılar bu sonucun etrafında dolaşmış olsalar da 1818 yılında Vicati adlı Fransız bir mühendis elde edilen bilgileri toplamış ve bazı açıklamalar yapmıştır. Buna göre, kalker oranının fazla olması durumunda elde edilen malzeme kireç gibi sönebilmekteydi. Kil oranının fazla olması durumunda ise kireç gibi sönmeye geçmemekte ve malzeme daha yüksek hidrolik özelliklere sahip olmaktadır [11]. 1824 yılında ise İngiltere'de bir duvarcı ustası olan Joseph Aspdin portland çimentosunu keşfetmiştir. Kullandığı kalker-kil oranı, 3-1 şeklindedir. Bu karışımı yüksek sıcaklıkta pişirerek üstün bir dayanım elde eden Aspdin, oluşturduğu çimentonun rengi, İngiltere'nin Portland yarımadasındaki killi kalkerlerin rengine benzediği için, buluşunu portland çimentosu olarak tescil ettirdi.

Portland çimentosu sonraki dönemde bir takım değişikliklere uğramış olsa da temelde aynı tür çimentolar üretilmeye başlandı. 19. yy'ın sonlarına doğru, diğer endüstrilerin atıkları çimento yapımında katkı maddesi olarak kullanılmaya başlandı. Yüksek fırın curufu, termik santral uçucu külleri ve silis dumanı bu malzemelere örnek olarak gösterilebilir. 20.yy'da bu tür malzemelere ek olarak üretim sürecini kolaylaştıran ve çimentonun dayanımını artıran bir takım kimyasal malzemeler de kullanılmaya başlandı. Başlangıçta kullanılan dik fırınların yerini 1886 yılından itibaren döner fırınlar aldı. Günümüzde, modern çimento fabrikalarında üretim sürecinin her aşamasında otomasyon kullanılmakta, enerji tasarrufu ve çevre uyumluluğu ön planda tutulmaktadır [12].

Çimento üretimi ve tüketimi, insanoğlunun yaşam kalitesinin artışına paralel olarak devamlı bir artış eğilimindedir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin verilerine göre, her yıl ortalama %1-8'lik bir artış hızına sahip çimento üretim ve tüketiminin yakın zamandaki seyri Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de görülebilir. 2004 ve 2005 yılının kesin rakamları henüz çıkarılmamış olmasına rağmen, bu yıllardaki üretim ve tüketimin 2004 yılından, benzer artış oranları kadar fazla olduğu tahmin edilmektedir.

Tablo 2.1: İlk Sıralardaki Ülkelerin ve Dünya Genelinin Yıllara Göre Çimento Üretimi

	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
ÜLKE	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton
ÇİN	813 190	704 140	627 170	586 200	573 000	536 000	511 750
HİNDİSTAN	115 932	108 144	104 040	102 360	98 256	85 610	82 296
U.S.D	92 843	89 732	88 900	87 846	85 952	83 931	82 582
JAPONYA	68 898	72 128	75 899	83 339	81 701	81 532	92 161
KORE	59 194	55 514	52 046	51 255	48 157	46 091	59 796
İSPANYA	44.758	42.422	40.520	38.154	35.830	33.081	29.693
İTALYA	43.511	41.499	39.904	39.020	37.391	36.222	34.509
RUSYA	42 204	39 672	35 280	32 316	28 500	25 968	26 568
BREZİLYA	38.136	37.221	33.368	38.059	35.949	38.213	37.198
MEKSİKA	34 010	38 027	38 938	39 559	40 234	39 942	38 096
ALMANYA	33 600	31 300	30 000	31 700	29 400	27 700	27 500
İRAN	33.409	31.502	32.903	35.894	37.887	35.783	31.228
TÜRKİYE	30 647	31 356	31 099	27 789	23 925	22 341	27 505
ENDONEZYA	30 466	28 455	26 644	23 930	21 740	20 264	19 140
TAYLAND	28 368	29 114	25 544	24 030	25 064	22 830	37 238
DÜNYA TOPLAM	1.956.773	1.814.245	1.701.039	1.657.715	1.603.578	1.536.265	1.531.169

Tablo 2.2: İlk Sıralardaki Ülkelerin ve Dünya Genelinin Yıllara Göre Çimento Tüketimi

	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
ÜLKE	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton	X1000 ton
ÇİN	808 892	699 807	621 284	580 502	567 171	528.334	502 581
HİNDİSTAN	112 748	105 013	101 638	99 206	97 426	83.455	78.480
U.S.D	112.281	108.205	112.561	109.527	108.426	103.254	96 166
JAPONYA	60.125	64.592	68.637	72.274	70.774	71.591	78 610
KORE	58.302	54.294	50.055	48.000	44.721	44.615	61 752
İSPANYA	46 224	44 120	42 150	38 439	34 627	30 990	26 794
İTALYA	43 482	41 269	39 469	38 338	36 147	34 686	33 768
RUSYA	40 607	38 312	33 614	31 007	27 280	24 842	16 185
BREZİLYA	33 785	37 978	38 398	39 368	40 199	40.142	38 438
MEKSİKA	30.000	29.000	26.860	29.000	28.500	26.900	25.200
ALMANYA	29 927	28 921	31 179	35 782	38 261	37 137	34 258
İRAN	29 720	27 513	25 252	22 462	19 853	19.892	19 048
TÜRKİYE	28 106	26 812	25 082	31 515	31 530	34 138	32 625
ENDONEZYA	27 539	27 180	25 530	22 329	18 770	19.075	27 402
TAYLAND	23 455	22 191	18 345	17 775	18.529	27.378	36.046
DÜNYA	1 949	1 807	1 695	1 649	1 600	1 539	1 517
TOPLAM	487	555	083	836	822	730	013

2.2. Çimento Hammaddeleri

Çimento başta kireçtaşı olmak üzere, kil, şeyl, marn, alçıtaşı, yüksek fırın curufu, uçucu kül, puzzolanik malzemeler, demir mineralleri vb. gibi maddelerin bir takım işlem kademeleri sonucunda oluşturdıkları bir maddedir. Su ve agregayla karıştırıldığı zaman beton oluşumunu gerçekleştiren hidrolik bir bağlayıcıdır. Çimentonun ana bileşenleri CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 'tür. CaO kireçtaşı, marn ve talk gibi hammaddelerden, diğerleri ise kil, şeyl ve diğer hammadde ve katkı maddelerinden karşılanmaktadır. Gerek, çevre problemlerinin azaltılması ve gerekse, maliyetlerin düşürülmesi açısından bu hammaddelere alternatif veya beraberinde kullanılabilecek bir takım maddeler de uygun olduğu takdirde kullanılabilmektedir. Örnek olarak, yüksek fırın curufları, termik santral uçucu külleri, demir cevherleri, doğal puzzolanik maddeler vb. verilebilir [10].

2.2.1. Ana Hammaddeler

Kireçtaşı

Kimyasal olarak en az %90 oranında CaCO_3 içeren kayalara kalker ya da kireçtaşı denilmektedir. Mineralojik bileşiminde en az %90 kalsit bulunan kayalara da kalker

adı verilmektedir. Kalker saf halde kalsit ve çok az miktarda aragonit kristallerinden oluşur. Kalsit ve aragonit kalsiyum karbonatın iki ayrı kristal şekli olup, teorik olarak %56 CaO ve %44 CO₂ içerir [10]. Çimento üretiminde kullanılacak tüm hammaddelerde olduğu gibi kalkerin de öncelikle kimyasal yapısının uygun olması, fabrikaya yakın bir alanda bulunması, kırılabilme, öğünelme ve pişirilebilmesinin kolay olması, nem içeriğinin düşük olması ve homojen olması önem arz etmektedir.

Kil

Mineralojik bileşiminde %90'a kadar kil minerali bulunan kayalara kil denilmektedir. Kil, hem bir kayaç terimidir hem de bir tane boyu terimi olarak bilinmektedir. Kimyasal olarak killer, silisyum, alüminyum ve sudan oluşmaktadır. Kayaç olarak doğal topraklı, ince taneli ve su ile karışıklarında plastik özellikleri gelişen materyaller kil terimi içerisinde yer almaktadır. Çimento sektöründe hammadde olarak kullanım alanı bulmuş killer, aşınma ürünü metal oksitlerin taşıyıp depolanma havzasında yığılmasından oluşmuş, çoğu killi ve kireçli topraklardır [10].

Marn

Klinker ortalama %70 kireçtaşı ve %30 kil içeren hammadde karışımının öğütüldükten sonra yüksek sıcaklıkta pişirilmesi sonucu oluşan bir malzemedir. Marn, %50-70 oranında kireçtaşı, %30-50 oranında kil içeren bir kayaçtır. Bu özelliği sayesinde doğal bir çimento hammaddesi olarak bilinmektedir. Kireçtaşına oranla daha yumuşak bir kayaç olduğundan, kırma-öğütme kademesinde harcanan enerji de daha az olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü hammadde olarak tercih edilmektedir [10].

2.2.2. Katkı Maddeleri

Alçıtaşı

Kimyasal bileşimi CaSO₄ olan, doğada yaygın bir şekilde bulunan bir mineraldir. Bileşiminde 2 mol su bulunan tipine jips, susuz kalsiyum sülfata ise anhidrit adı verilmektedir. Anhidrit başta sülfirik asit üretimi olmak üzere kimya endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alçıtaşı, çimento bileşimine yaklaşık %5 oranında katılarak, priz süresinin ayarlanmasına yardımcı olur [13].

Puzzolanlar

Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmadığı halde kireç hidrat ile birleştiği zaman bağlayıcılık özelliği kazanan malzemelerdir. Bileşiminde silis, alüminyum silikatlar mevcuttur [14]. Doğal puzzolanlara örnek olarak killer, şeyller, opal, çört, diatomit, volkanik tüfler, sünger taşları verilebilir. Yapay puzzolanlar ise, doğal malzemelere, ısıtma işlemi uygulanması sonucu puzzolanik özellik kazandırılması suretiyle oluşturulur. Yapay puzzolanlara örnek olarak uçucu küller, öğütülmüş tuğla, kiremit ve bazı curuflar gösterilebilir. Çimentodaki oranları %10-30 arasında olabilmektedir [11].

Yüksek Fırın Curufu

Demir üretimi sonucu ortaya çıkan, bileşiminde kalsiyum alümina silikatlar bulunan malzemedir. Çimento bileşiminde kullanılabilmesi için, içeriğinin $\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \geq 1$ denklemini sağlaması gerekir. Demir üretimi esnasında

SiO₂ ve Al₂O₃ CaO tarafından bağlanarak curuf oluşumunu gerçekleştirir. Oluşan bu curufun bileşimi, portland çimentosu bileşimine çok yakındır [11,14].

Kireçtaşı

Katkı maddesi olarak kullanılacak kireçtaşının CaCO₃ içeriği en az %75 olmalıdır. Kil içeriği ise %1-2'yi geçmemelidir [14].

Silis Dumanı

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli baca tozudur. Reaktif silis içeriği en az %85 olup BET özgül yüzeyi en az 15000 cm² /gr. olmalıdır. Kızdırma kaybı 1 saate %4'ü geçmemelidir [14].

Uçucu Küller

Bunlar pulverize kömür yakan termik santrallerin baca filtrelerinde toplanan atıklardır. Küresel tane şekillidirler. Kimyasal olarak, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ içerirler. Uçucu küller de puzzolanik malzemeler gibi Ca(OH)₂ ile tepkimeye girdikleri zaman bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Kalite ve yapılarına bağlı olarak, çimentonun yapısında %30 oranında bulunabilirler [14].

Pişmiş Şist

Şistler 800 °C'de pişirildikleri zaman puzolanik ve bağlayıcı özellik kazanırlar. Bu şekilde çimento üretim prosesinde katkı maddesi olarak kullanılabilirler. 28 günlük basınç dayanımları en az 25 MPa olmalıdır. Hacim genleşmesi ise 10 mm'yi geçmemelidir [14].

2.3. Enerji Tüketimi

Kullanılan prosese bağlı olarak, bir çimento fabrikası, 1 ton klinker üretimi için 700-1000x10⁶ kcal ısı enerjisi tüketmektedir. Ayrıca elektrik enerjisi tüketimi ise 90-120 kWh/t çimentodur. Başlıca yakıt kaynakları kömür, petrokok, doğalgaz ve yağdır (fuel oil) . Tablo 2.3'de çimento sektöründe kullanılan enerji hammaddelerinin ortalama kullanım oranları görülmektedir.

Tablo 2.3: Çimento Üretim Prosesinde Kullanılan Enerji Hammaddelerinin Kullanım Oranları [15].

Enerji Hammaddesi	Taşkömürü	Linyit	Gaz Yağı	Petrokok	Doğalgaz	Diğerleri
Kullanım Oranı _%_	36	6	7	39	2	10

2.4 Çimento Üretimi Sırasındaki Emisyonlar

Emisyonları klinker fırınından çıkan gazlar oluşturmaktadır. Bunların başlıcaları, yanma havasından gelen nitrojen, kalsinasyon ve hammadde proseslerinden gelen su, çıkış gazındaki O₂ ayrıca az miktarda toz, klorit, florit, sülfür di oksit (SO₂), NO_x, CO ve az miktarda da organik bileşikler ve ağır metallerdir. Bu emisyonları azaltılabilmesi için alternatif yakıt kullanımı çalışmaları devam etmektedir. Tipik bir çimento fabrikasının baca gazı bileşimi Tablo 2.4'de görülmektedir. Çimento fırınından gelen çıkış gazları elektrostatik filtrelerden geçer ve tutulan toz prosese geri gönderilir.

Tablo 2.4: Çimento Fabrikası Baca Gazı İçeriği [15].

Çıkış Gazı Cinsi	N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	Diğerleri
Miktar _%_	45-66	11-29	10-39	3-10	<1

2.5 Çimento Üretim Teknolojisi

Çimento genel olarak hammadde öğütme, pişirme ve nihai öğütme kademeleri sonucu oluşan bir üründür. Çimento üretiminde genel olarak 3 farklı prosesten söz etmek mümkündür [16]. Bunlar,

1-) Kuru Proses 2-) Yarı-kuru Proses 3-) Yaş Proses

Kuru proses, daha fazla enerji tasarrufu sağladığı için tercih edilmektedir. Şu an Dünyada var olan fabrikaların çoğu kuru prosese uygun olarak çalışmaktadır ve yeni kurulmakta olan fabrikaların da hepsi kuru prosese uygun olarak tasarlanmaktadır [16]. Yaş üretim prosesi, uygun nem içeriğine sahip hammadde sağlanamadığı durumlarda tercih edilmektedir.

Tüm bu proseslerin bir takım ortak alt işlem kademeleri bulunmaktadır. Bunlar;

1-) Hammadde Kazanımı: Kireçtaşı, talk, marn, kil ve şeyl gibi hammaddelerin, madencilik faaliyetleri sonucu üretilmesi, kırılıp depolanması. Malzemeler ayrı ayrı depolanabildiği gibi, uygun besleme kompozisyonunu oluşturacak biçimde karıştırılarak da depolanabilir [15,16].

2-) Hammadde Hazırlama, Farin Oluşturma: Depolama ve ön harmanlamadan sonra hammaddeler kurutulur ve hammadde değirmenine beslenir. Elde edilen ürünün boyutu $d_{90} = -90$ ila -75 mikron'dur. Oluşan ürün, farin olarak adlandırılmaktadır. Bu safhada bilyalı değirmenler kullanılabildiği gibi günümüzde rulolu dik değirmenler gibi, daha verimli olarak görülen, farklı tipte değirmen kullanımları mevcuttur. Farin, döner fırına beslenmek üzere silolarda depolanır. 1 ton klinker üretebilmek için 1,5-1,6 ton hammaddeye ihtiyaç duyulmaktadır [15-17].

3-) Döner Fırında Kullanılacak Enerji Verici Malzemenin Hazırlanması: Bu kademe örneğin taşkömürü için, kırma, kurutma, öğütme ve homojenizasyon, hazırlama adımlarından oluşmaktadır. Kömür değirmeni, silolar ve depolama alanları

katı yakıtlar için, tanklar ve bunların nakil ve besleme hatları sıvı yakıtlar için, gerekli ek teçhizat olarak karşımıza çıkmaktadır [15,16]

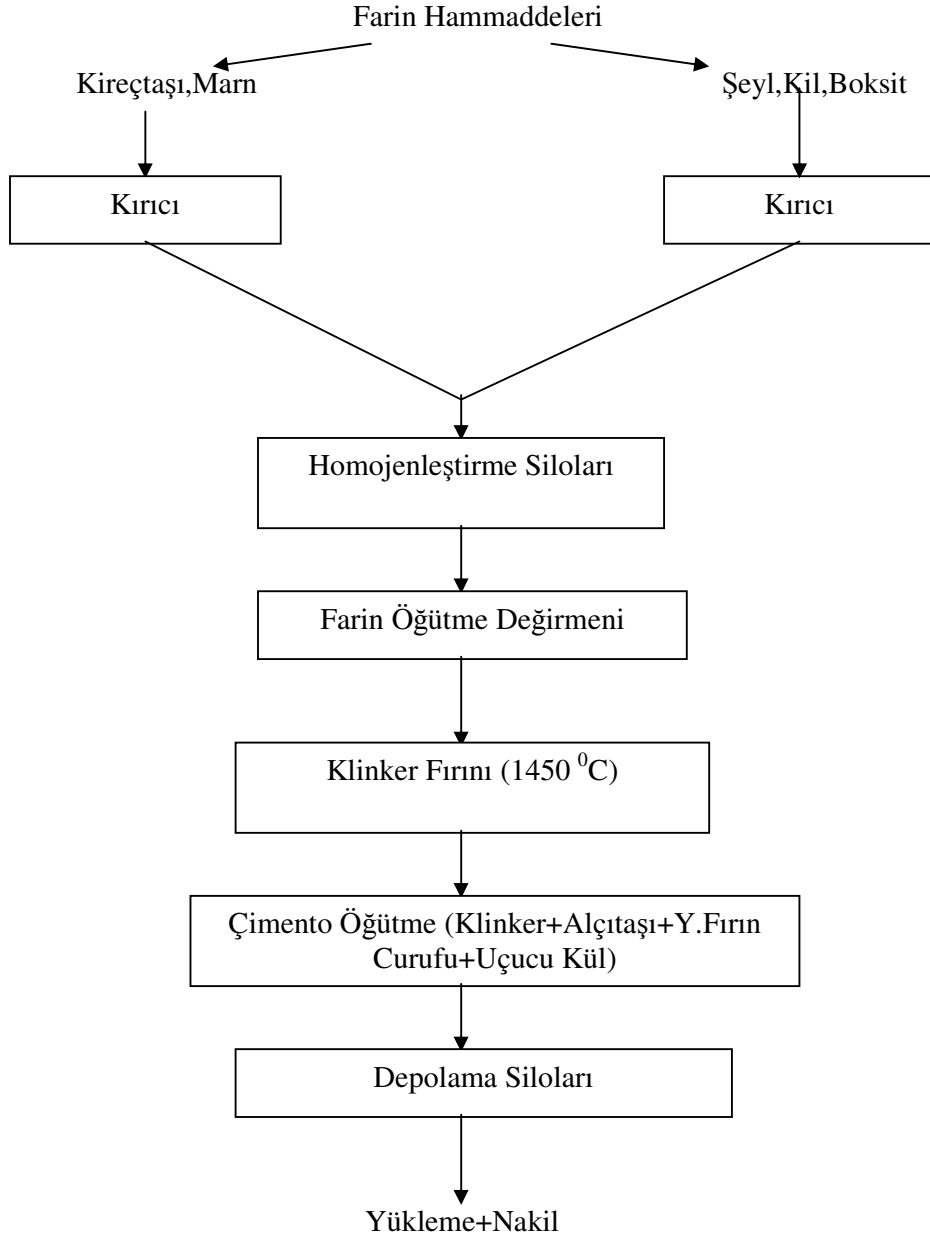
4-) Klinker Oluşturma Safhası: Bu safhada, hazırlanan farin fırın sistemine beslenmektedir. Günümüzde boyları 70-120-165 m. çapları 3-5 m. olan döner fırınlar kullanılmaktadır. Fırının boy çap oranı 10 ila 40 arasındadır. Bu fırında sırasıyla kurutma, ön ısıtma, kalsinasyon (Kireçtaşıdan CO_2 'nin uzaklaştırılması) ve sinterleşme-klinkerleştirme işlemleri gerçekleşir. Klinkerleştirme işlemi 1450°C 'de gerçekleşmektedir. Oluşan klinker, hava akımı ile soğutulur ve sıcaklığı $100-200^{\circ}\text{C}$ 'lere kadar düşer. Daha sonra klinker, depolanmak üzere silolara nakledilir. Kurutma ve ön ısıtma $20-600^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşir ve bu safhada serbest ve kimyasal bileşik halinde bulunan su, ortamdan ayrılır. Kalsinasyon $600-900^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşmektedir. Bu safhada, klinkerin oluşumu için ilk reaksiyonlar başlamaktadır. Sinterleşme veya klinkerizasyon safhası ise, $1250-1450^{\circ}\text{C}$ civarında gerçekleşmektedir. Bu safhada kalsiyum silikat oluşumu ve sıvı fazı gözlenmektedir [15,16].

5-) Katkı Maddelerinin Hazırlanması: Kompozit çimento yapımında kullanılan malzemelerin kurutulması, kırılması ve ayrı ayrı olarak öğütülmesi gerekebilmektedir. Genel olarak ayrı ayrı öğütme, hammaddelerin birbirinden uzak olduğu durumlarda ve farklı cins çimento talep edilmesi durumunda gerçekleştirilmektedir [15,16].

6-) Klinker+Katkı Maddesi (Çimento) Öğütme Safhası: Portland çimentosu klinker ve az miktarda alçıtaşının öğütülmesi sonucu oluşur. Kompozit çimento ise, klinkerle birlikte yüksek fırın curufu, uçucu kül, doğal veya endüstriyel volkanik tüf (puzzolonik madde), kireçtaşı gibi katkı maddelerinin öğütülmesi sonucu elde edilir. Kompozit çimento, katkı maddelerinin klinkerle birlikte, ya da ayrı ayrı öğütülüp daha sonra portland çimentosu ile karıştırılarak oluşturulabilmektedir. Çimento öğütmeye 110°C 'in üzerinde ve 90°C 'in altında besleme yapılmamalıdır. Yüksek sıcaklıklarda yapılacak öğütme işlemi sonucu oluşmuş çimentonun dayanımı düşük olur [15,16].

7-) Çimento Paketleme ve Sevkiyatı: Çimento, yığın şeklinde gemilerle ya da 50 kg'lık paketler halinde nakledilir [15,16].

Şekil 2.1'de çimento üretiminin genel akım şeması görülmektedir.



Şekil 2.1: Tipik Bir Çimento Tesisinin Genel Akım Şeması [16].

3. ÖĞÜTME VE ÇİMENTODA ÖĞÜTME

3.1. Öğütme

Genellikle 25 mm. boyutu altında yapılan boyut küçültme işlemine öğütme denilmektedir. Kullanılan makinalara ise, değirmen adı verilmektedir. Öğütmede kırmanın aksine öğütme yapan yüzeyler, aralarında cevher bulunmadığı zamanlar birbirleriyle temas halindedirler. 5 ana öğütme sistemi mevcuttur.

1-) Aktarılan Ortam Sistemi: Ortam olarak çakıl, çubuk, bilya veya cevher tanelerinin kendisi kullanılabilir (Çakıllı, çubuklu, bilyalı, otojen, yarı otojen değirmenler).

2-) Yuvarlanan Merdane Sistemi: Dairesel zemin üzerinde dönen silindir ve valsler (Valsli değirmen).

3-) Dönen Disk Sistemi: Sabit veya dönen disk.

4-) Darbe Etkisi: Sabit zemin üzerine düşürülen ağırlıklar.

5-) Titreşim Hareketli Sistem: Titreşimli değirmenler [18].

Aktarılan ortam sistemi, endüstride yaygın olarak kullanılan bir sistemdir. Öğütme, öğütücü ortam adı verilen cisimler (çubuk, çakıl, bilya ve cevherin kendi iri parçaları) arasında sıkışma ve sürtünme etkisiyle gerçekleştirilir. Öğütme silindirik, silindirokonik veya konik bir gövde içerisindeki malzemenin (öğütücü ortam, öğütülecek malzemenin kendisi, sisteme göre su) sürekli olarak aktarılmasıyla gerçekleşir.

3.1.1. Kuru ve Yaş Öğütme

Üretildiğinde yüksek nem içermeyen cevherler kullanım yeri gereği kuru olarak öğütülebilirler. Kuru öğütme için öğütülecek cevherin öğütme öncesinde veya öğütme içerisinde sıcak hava ile nem oranının düşürülmesi gerekir. Öğütülmüş malzeme, fan veya basınçlı hava ile çalışan pnömatik pompalarla taşınır. Kuru öğütmede malzemenin değirmen içindeki hareketini sağlamak için, değirmen çıkış

tarafına vakum veya giriş tarafına basınçlı hava uygulanır. Uygulanan bu vakum veya basınçlı hava, küçük boyutlu cevher tanelerinin değirmen cidarını kaplamasını önlemeli ve tanelerin öğütülebilmesi için değirmen içerisinde yeterli süre kalabilmelerini sağlamalıdır. Kuru öğütmede bilyalı değirmen içindeki hava akımı, öğütülen malzemeyi dışarı taşımaktadır. Kuru öğütme sisteminde bilyalı değirmenlerin yanı sıra titreşimli, merdaneli, otojen ve çubuklu değirmenler de kullanılabilmektedir [19].

Cevher hazırlama tesislerinde öğütme sonrası gelen zenginleştirme işlemlerinde genellikle su kullanıldığı için öğütme de genellikle yaş olarak yapılmaktadır. Yaş öğütme açık ve kapalı devre şeklinde tertip edilebilmektedir. Açık öğütme devreleri proste boyut dağılımının fazla önem taşımadığı durumlarda seçilmektedir. Kapalı öğütme devrelerinde ise bir sınıflandırıcı birim bulunmaktadır. Kapalı öğütme devreleri de kendi içinde klasik ve sınıflandırıcı sonrası kapalı devre olacak şekilde ikiye ayrılmaktadır. Klasik kapalı devrede cevherin tamamı önce değirmene sonra sınıflandırıcıya gönderilir. Yani değirmene beslenen cevherin belirli bir kısmı zaten istenilen boyuttaki tanelerden oluşmaktadır. Bu durum gereksiz bir kapasite düşüşüne ve enerji sarfiyatına yol açmaktadır. Ayrıca bu malzeme, değirmenden geçerek istenmeyen inceliğe de gelebilmektedir. Sınıflandırıcı sonrası kapalı devrede ise cevher önce sınıflandırıcıya gönderilir ve öğütülmesi gerekli olan iri taneli cevher, ince tanelerinden ayrıldıktan sonra değirmene beslenir. Bu devrelerin kapasiteleri daha yüksektir ancak bu uygulamada aşınma sorunu mevcuttur. Sınıflandırıcıya gönderilen cevher, siklon, pompa ve akış hattında aşırı aşınmalara neden olabilmektedir [19].

Yaş öğütmede, pülpte katı oranı öğütme verimliliğini etkileyen önemli bir unsurdur. Pülpte katı oranı genellikle %60 civarındadır. Değirmenlerin düşük pülp yoğunluğunda çalıştırılmaları gereksiz enerji tüketimine, astar ve öğütücüde gereksiz aşınmalara neden olurken öğütme devresinin kapasitesini de büyük oranda düşürmektedir. Yüksek yoğunluktaki pülp ise değirmen içinde astar yüzeyinden geriye doğru kayarak öğütmeyi olumsuz yönde etkiler [19].

Kuru ve yaş öğütme arasındaki farklar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1-) Yaş öğütmede enerji tüketimi kuru öğütmedekinin %60-90'ı kadardır. İlgili çalışmada yaş öğütmede harcanan enerjinin kuru öğütmeye göre %30 daha düşük olduğu gözlenmiştir [20].

2-) Yaş öğütmede öğütücü ortam miktarı değirmen iç hacminin %40-50'si iken bu değer kuru öğütmede %35-45 civarındadır.

3-) Yaş öğütmede daha yüksek değirmen hızları kullanılabilir.

4-) Kuru öğütmede, birim değirmen hacmi ve birim ortam ağırlığına göre daha düşük öğütme kapasiteleri elde edilmektedir.

5-) Kuru öğütmede, astar ve öğütücü ortam tüketimi yaş öğütmeye göre %10-25 daha fazladır [18, 20].

Ayrıca yaş ve kuru öğütmeye yapılan besleme şekli ve öğütülmüş cevherin değirmenden boşalma şekli de farklılık göstermektedir. Yaş öğütmede salyangozlu, borulu ve tamburlu besleme uygulamaları kullanılabilirken, kuru öğütmede besleme titreşimli, bantlı, spiralli besleyiciler veya pnömatik pompalar vasıtasıyla yapılmaktadır. Yaş öğütmede kullanılan boşaltma şekilleri ise, taşmalı, ızgaralı ve kapalı tip olabilirken, kuru öğütmede cevher hava ile taşınmaktadır [21].

3.2.Bilyalı Değirmenler

Günümüzde bilyalı değirmenler, özellikle cevher hazırlama tesislerinde yaygın olarak kullanılan değirmenlerdir. Çimento üretiminde ise özellikle ikinci kademe öğütmede kullanılmaktadırlar.

3.2.1 Bilyalı-Aktarmalı Değirmenler

Bilyalı değirmenler, genellikle ikinci kademe ve ince öğütme devrelerinde kullanılmaktadırlar. Uygulamada değirmene besleme boyutu -10 mm ile -1,2 mm arasında değişmektedir. Öğütülen cevher tane boyutu ise -600 µm ile -28 µm boyutlarına kadar ulaşabilmektedir. Ortam olarak çelik veya flint taşı bilyalar kullanılmaktadır. Bilyalar küresel, silindirik veya konik şekilli olabilir. Uygulama alanına göre çeşitli alaşımlardan, çok daha sert bilyalar yapmak mümkündür. Bilyaların hareketi üç şekilde gerçekleşir [22].

1- Kendi içinde dönme 2 - Kayarak yuvarlanma 3- Serbest düşme

Bu hareketlerin etkisiyle malzeme üzerinde çeşitli kuvvetler oluşur ve malzeme parçalanır. Bu kuvvetler darbe, sıkıştırma veya ezme, kesme ve sürtünme kuvvetleridir. Sürtünme ile boyut küçültme aşınma sonucu oluşur. Diğer kuvvetler ile taneler genellikle kırılarak küçülürler. Ayrıca cevherin sert ya da yumuşak olması, o cevherin kolay veya zor öğünebileceği anlamına gelmemektedir. Öğünebilirlik malzemelerin kristal yapısı, bu yapının içindeki kristal ve fiziksel yapı bozuklukları ile ilgilidir [23].

Bilyalı değirmenlerde kapasiteyi etkileyen belli başlı unsurlar bulunmaktadır. Değirmen ve cevher özellikleri ile alakalı olan bu unsurlar birbirleri ile de ilişkili olduklarından, verimli bir öğütme sağlayabilmek için uygun parametrelerin seçilmesi gerekir. Tablo 3.1’de değirmen kapasitesine etki eden faktörler verilmiştir.

Tablo 3.1: Bilyalı Değirmen Kapasitesine Etki Eden Faktörler [18]

CEVHER ÖZELLİKLERİ	DEĞİRMEN YAPISI	DEĞİRMEN ÇALIŞMA ŞEKLİ
Sertlik-Yumuşaklık	Değirmen Hacmi	Değirmen Dönüş Hızı
Özgül Ağırlık	Astar- Şekli,Türü	Açık-Kapalı Devre
Tane boyutu	Öğütücü Ortam Cinsi (Özgül ağırlığı, boyutu, miktarı)	Yaş-Kuru Öğütme
	Taşma Şekli	Katı-Su Oranı ve B.K.O

Değirmenlerde kritik hız kavramı çok önemlidir. Bilya yoğunluğu ve değirmen içerisindeki bilya üzerine etki eden merkezkaç kuvveti esas alınarak ortaya çıkartılan kritik hız formülüne göre, değirmenin kritik hızı değirmen çapına bağlıdır. Kritik hıza ulaşan bir değirmen içerisinde bulunan bilya tanesi, üzerine etki eden kuvvetler dolayısı ile değirmene yapışık bir halde hareket edecek ve öğütme işlemi yapmayacaktır. Bu sebepten dolayı uygulamada kullanılacak olan hız, kritik hızın %50-90’ı civarında olmalıdır.

Bilyalı değirmenlerde boy/çap oranı iri öğütme için 0,7-1 arasında iken ince öğütmede 1-2,5 arasında olabilmektedir. 2-3 bölmeli çimento değirmenlerinde değirmen boyu çapının 5 katı kadar olabilmektedir [19].

3.3 Çimento Üretim Sürecinde Kullanılan Değirmenler

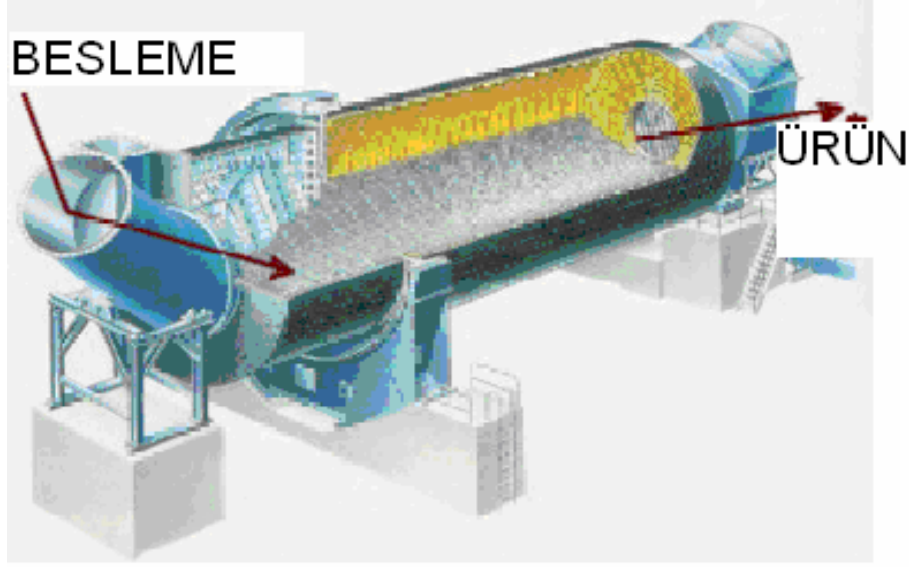
Çimento üretimi iki ayrı öğütme kademesi içermektedir. Bunlar farin oluşturma amaçlı, hammaddelerin öğütülmesi kademesi ve farinin pışırılması sonucu elde edilen klinkerin öğütülme kademesidir. Öğütme işlemlerinde birbirinden farklı yapı ve tasarıma sahip değirmenler kullanılabilmektedir. Değirmen seçimini etkileyen en önemli unsurlar; maliyet, kalite, farklı cins çimento talebi olarak sıralanabilir. Aşağıda çimento üretiminde kullanılan farklı tip değirmenler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

3.3.1 Bilyalı Değirmenler

- Bilyalı değirmenlerde boy-çap (L/D) oranı önem arz etmektedir. Optimum L/D oranı çimento için 3'tür. Değirmenlerin boyları 11-14 m.; çapları 3-4 m. olabilmektedir [19,21].
- Kapalı ve açık devre tercih edilebilir. Açık devre bilyalı değirmenle daha ince boyutta malzeme elde etmek güçtür [19,21].
- Sistem büyük oranda kuru çalışmaktadır. Öğütülen malzeme havalı klasifikatör ile taşınmakta, yeterli incelik veya yüzey alanı veren malzeme yine hava akımı ile silolara taşınarak depolanmaktadır. İstenilen boyuta ulaşmamış malzemeler ise devreden yükü oluşturur. İdeal hava akış hızı 0,6 m/s ila 1 m/s arasında değişmektedir [19,21,24].
- Çeşitli tip yapıda bilyalı değirmenler bulunabilmektedir. Çift girişli bilyalı değirmenlere taze malzeme girişi bir taraftan yapılırken, ayırıcıdan gelen devreden yük diğer taraftan girer değirmene. Çimento üretiminde yaygın olarak kullanılan bir başka bilyalı değirmen tipi ise iki bölmeli bilyalı değirmenlerdir. 1.bölmede iri öğütme yapılmakta, boyutu küçülen malzeme aradaki ızgaradan geçerek 2. bölmeye akmaktadır. Ürün nihai boyutuna 2.bölme sonunda ulaşılmaktadır. [19,21].

- Nihai boyut küçüldükçe, aynı boyut küçültme oranına karşılık harcanan enerji miktarı artmaktadır. Örnek olarak;

Bir kireçtaşı numunesini 30 mm'den 3 mm'ye indirebilmek için 2 kWh/t'luk bir enerjiye ihtiyaç duyulurken, 3 mm'den 0,3 mm'ye indirebilmek için 6 kWh/t ve 0,3 mm'den 0,03 mm'ye indirebilmek için ise 24 kWh/t'luk bir enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.1 ve 3.2'de çimento üretiminde kullanılan bilyalı değirmenin, iç ve dış görünümü izlenebilir.



Şekil 3.1: Tipik Bir Bilyalı Değirmen İç Yapısı ve Malzeme Akışı



Şekil 3.2: Çimento Üretiminde Kullanılan Bilyalı Değirmenin Dış Görünümü.

Bilyalı çimento değirmeninde yüksek enerji tüketiminin sebepleri;

1. Bilya şarjının aşınması veya değişikliğe uğraması
2. Kamaraların olması gerekenden çok uzun olması
3. Malzeme ile ilgili problemler [24].

3.3.2. Dikey Rulolu Tip Değirmenler

Bu değirmenler özellikle farin oluşturma amaçlı yapılan hammadde öğütme işleminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Farklı firmalar tarafından üretilmiş olan tüm dikey değirmenlerin bir takım ortak işlev ve özellikleri bulunmaktadır.

- Dikey eksen etrafında dönen bir disk.
- Dönen öğütücü ortam.
- Öğütücü ortama uygulanan basınç (Ağırlık, hidrolik basınç).
- Disk'in (Ana gövde) çevresinde oluşturulan ve malzemenin taşınmasını ve kurutulmasını gerçekleştiren hava akımı.
- Disk ve öğütücü ortam üzerinde bulunan havalı klasifikatör [24].

Dikey değirmenler daha çok kömür ve hammadde öğütülmesinde kullanılmaktadır. Çimento öğütülmesinde ise nadir olarak kullanılmaktadır.

Öğütücü ortamın altına geçen yani öğütülen malzeme değirmen gazlarıyla taşınır. İnce malzeme değirmenin hemen üzerinde bulunan statik veya dinamik ayırıcıya gider. Buradan da siklon veya filtrelere beslenir. Yüksek hava akışı ve ısı değişimi, dikey değirmenin kurutma kapasitesini üstün kılmaktadır. Hammaddeler için %20 nem içeriğine kadar uygundur. Avantajları;

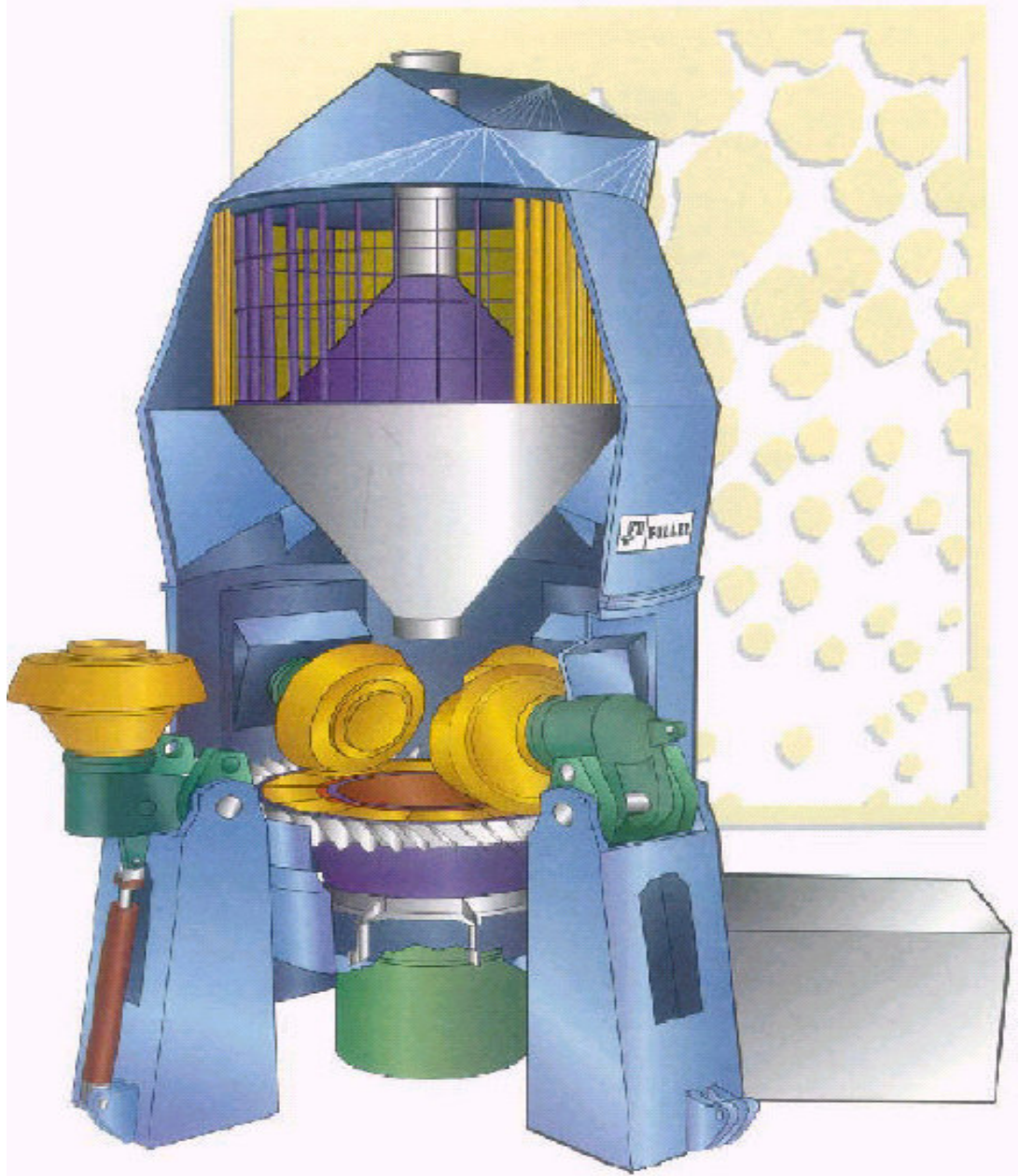
- Öğütme prosesi bilyalı değirmene göre daha verimlidir.
- %20 nem içeriğine sahip malzemeyi kurutma özelliği vardır.
- Kapasiteleri yüksektir.
- Çimento ve curuf öğütmeye uygundur.

Dezavantajları;

- Malzeme yatak formasyonuna karşı hassastır.

- Aşınmaya karşı hassastır. Aşındırıcı malzemelerden çabuk etkilenebilir.
- Yabancı maddelere karşı duyarlıdır [24].

Şekil 3.3 ve şekil 3.4’de dikey rulolu değirmenin iç ve dış yapısı görülmektedir. Tablo 3.2’de ise bilyalı ve dikey değirmenlerin enerji sarfı ve aşınma parametrelerine göre karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.3: Tipik Bir Dikey Rulolu Değirmenin İç Yapısı.



Şekil 3.4: Dikey Rulolu Değirmenin Dış Görünümü.

Tablo 3.2: Bilyalı ve Dikey Değirmenlerin Enerji Sarfı ve Aşınma Parametrelerine Göre Karşılaştırılması [24].

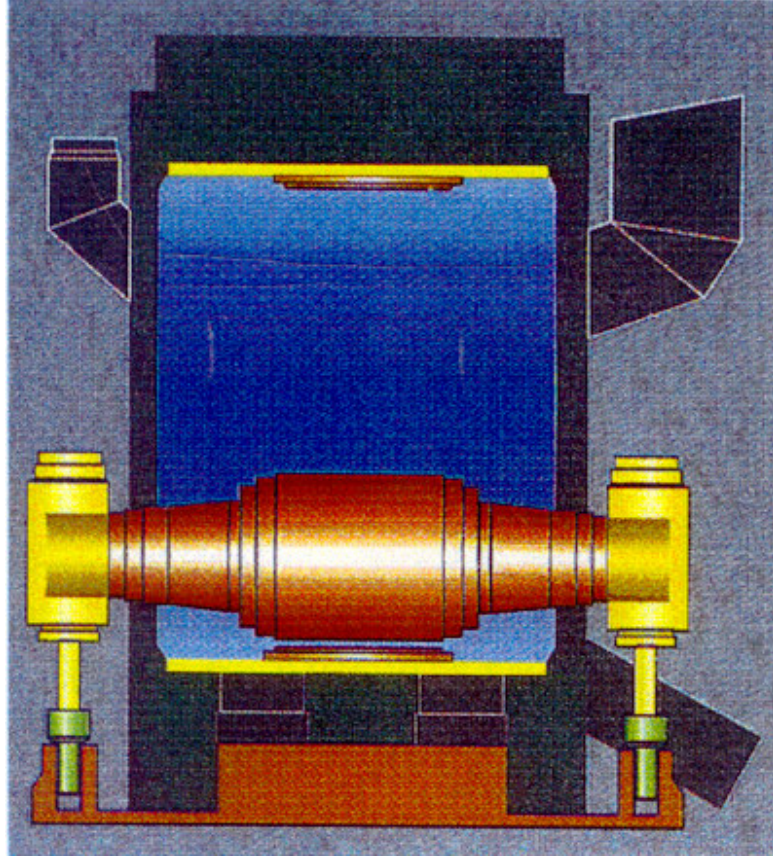
PARAMETRE	BİLYALI DEĞİRMEN	DİKEY DEĞİRMEN
Enerji Sarfı _kWh/t_	48	30-34
Aşınma _g/t_	20-40	1-4

3.3.3 Yüksek Basınçlı Merdaneli Değirmen (Horomill)

Yeni nesil değirmenlerden bir tanesi de horomill olarak bilinen değirmendir. Bu değirmenler basınçla sıkıştırılır ve açıklığı basınçla ayarlanır. İçerisinde dik değirmenlerdekine benzer dönen ve malzemeyi öğütmeye yarayan sert merdaneler bulunmaktadır. Bunların yüzeyleri sert metallerle kaplanmıştır (Örn:Neodimiyum karbid alaşımı). Bu cisimlerin ağırlığı 60 ton ve sağladıkları öğütme kuvveti ise 1760 ton kuvvet olabilmektedir [24].

Malzeme iki merdane arasındaki alanda öğütülür. Bu değirmende ani çarpmalar yoktur. Dolayısıyla fazla ısı ve ses üretimi söz konusu değildir. Ancak değirmene içerisinde ciddi miktarda bir sıkıştırma-basınç zonu oluşturulmaktadır. Hareket mekanizması genel olarak dikey değirmenlere benzemektedir.

Malzeme değirmenin içerisinde çok kısa bir süre kalır. Bu süre 10 saniye kadar olabilmektedir. Değirmenin işletilmesi diğer bir çok değirmene göre çok daha kolaydır. Buna ek olarak yapılacak bir takım değişiklik ve ayarlamalar da daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. Malzeme sıkıştırılması bir kaç kademedede olduğu için ve her bir kademe düşük çalışma basınçlarına sahip olduğu için değirmenin aşınması ve tamir-bakım masrafları daha azdır. Şekil 3.5’de yüksek basınçlı merdaneli değirmen görülmektedir [24].



Şekil 3.5: Yüksek Basıncılı Merdaneli Değirmen.

3.4 Öğütmede Enerji Sarfıyatı

Öğütmede harcanan enerjiyi pek çok unsur etkilemektedir. Sarf olunan enerjiyi hesaplayabilme amaçlı çeşitli yöntemler geliştirilmiş ve bu yöntemler uygulanarak etkin parametrelerin enerji sarfıyatındaki rolleri araştırılmıştır. Bu etkenlerin birbirleriyle olan ilişkilerini anlamak ve öğütme koşullarını doğru bir yorumdan sonra belirlemek, enerji sarfıyatı açısından son derece önemlidir.

3.4.1. Enerji Sarfıyatını Etkileyen Parametreler

Öğütme masrafları esas itibarıyla üç bölüme ayrılır.

1- Enerji Sarfıyatı 2- Malzeme 3- İşçilik

Öğütmedeki maliyetin en önemli kısmı elektrik enerjisi sarfiyatından ileri gelir. İkinci sırayı ise, bilya ve astar aşınmaları almaktadır. Bilya sarfiyatı ton başına 0.5-1.5 kg.'dır. Astarların aşınması ise ton başına 0.25-1 kg.'dır [25].

Öğütmede sarf edilen enerji türü kinetik enerjidir. Elde edilen enerji ise potansiyel enerji, ısı enerjisi ve sestir. Öğütme randımanının tayini için ölçülmesi gerekenler unsurlar;

1-Değirmene giren enerji toplamı.

2- Özgül yüzey enerjisi.

3- Ölçülen nokta ile enerjinin boyut küçültme işine sarf olunduğu nokta arasında transmisyondaki enerji kaybı.

4- Meydana gelen yeni yüzey toplamı [21].

Değirmen boşa çalışırken değirmene giren enerji miktarı iletim kayıpları olarak kabul edilebilir. Öğütmeyle enerji sarfiyatı arasındaki ilişkiyi etkileyen bazı unsurlar bulunmaktadır. Enerji sarfiyatını etkileyen bu unsurlar genel olarak;

1-Öğütme zamanı.

2- Cevher Özellikleri (Besleme boyutu, sertlik, gevreklik).

3-Bilya şarjı (boyutu-özümlü ağırlığı-kullanım miktarı).

4- Yaş öğütmede Pülpte Katı Oranı .

5-Değirmen Dönüş Hızı.

6-Değirmen hareket şekli (aktarmalı, titreşimli).

7- Kullanılabilecek reaktif cinsleri ve miktarı şeklinde verilebilir [21].

Bu unsurlarla ilgili;

1- Öğütme zamanı arttıkça enerji sarfiyatının da artacağı açıktır. Ayrıca boyut küçültme işleminin çok büyük bir kısmı ilk 1 dakika içinde gerçekleştiğinden, zamanı verimli kullanmak çok önemlidir [26].

2- Cevherin sertliği ve kırılabilirlik özelliği harcanacak enerjiyi etkilemektedir.

3- Büyük çaplı bilyalarla daha iri öğütme daha kısa sürede, küçük çaplı bilyalarla ise daha ince öğütme daha uzun sürede yapılabilir.

4- Pülpte katı oranı (P.K.O) ile enerji sarfiyatı arasındaki ilişkide, elde edilen boyut da önemli olduğu için en uygun P.K.O değişik cevher ve koşullar için farklıdır.

5- Değirmenin hızının artırılması enerji sarfiyatını artırır.

6- Hareket şekli enerji sarfiyatını etkiler.

7- Kullanılacak reaktifler sayesinde enerji sarfiyatı azaltılabilir.

Yukarıdaki açıklamalar yalnızca genel olarak söylenebilir. Uygulamada ekonomiklik önceliklidir. Enerji sarfiyatı ile öğütme arasındaki ilişki konusundaki amaç, en uygun sarfiyatta istenilen boyuta ulaşabilmek olduğundan çoğu yerde bir çok etkenin aynı anda göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Örneğin P.K.O 'nın artırılması enerji sarfiyatında da bir artışa neden olurken ulaşılan boyut küçülmektedir. Benzer olarak, bilya yüklemesindeki değişiklik ürün boyutunda küçülmelere yol açabilirken, enerjide büyümelere neden olabilmektedir. Bu yüzden öğütme için uygun koşulların denenerek bulunması gerekmektedir.

3.4.2 Enerji Teorileri

Enerji sarfiyatının belirlenebilmesi için çeşitli araştırmacılar çeşitli yöntemler geliştirmiştir. Bunların içerisinde Bond'un boyut küçültme teorisi hala yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3.4.2.1 Rittinger Teorisi

Boyut küçültme ile ilgili olarak ilk teorik çalışma 1867 yılında P.Pitter Rittinger tarafından ortaya atılmıştır. Rittinger'e göre; boyut küçültmede harcanan enerji öğütme sonucu oluşan yeni yüzey alanı ile orantılıdır. Rittinger yasası (3.1)'de ifade edilmiştir.

$$E= K(1/P-1/F) \quad (3.1)$$

burada,

E: Enerji tüketimi (kWh/t).

F: Beslenen cevher tane boyutu (mikron).

P: Ürün tane boyutu (mikron).

K: Katsayı.

Bu çalışmanın teorik olarak en büyük eksiği, kırma öncesi parçanın deformasyonunun göz önüne alınmamış olmasıdır. Ayrıca bu teori deneysel ve matematiksel olarak da kanıtlanmış değildir [19].

3.4.2.2. Kick Teorisi

1885 yılında Kick tarafından ikinci boyut küçültme teorisi ortaya atılmıştır. Bu teoride boyut küçültme için gerekli olan enerjinin malzemenin ağırlığına ve hacmine göre değiştiği savunulmuştur. Kick formülü (3.2)'de ifade edilmiştir [19].

$$E = L \log(P/F) \quad (3.2)$$

burada,

E: Enerji tüketimi (kWh/t).

F: Beslenen cevher tane boyutu (mikron).

P: Ürün tane boyutu (mikron).

L: Katsayı.

3.4.2.3. Bond Teorisi

1952 yılında F.C. Bond kendi adıyla anılan teoriyi ortaya atmıştır. Bu teoriye göre boyut küçültme için gerekli enerji, boyut küçültme birimine beslenen cevherin %80'inin geçtiği boyut ve birimden çıkan ürünün %80'inin geçtiği boyutun terslerinin karekökleri ile orantılıdır. Formül (3.3)'de ifade edilmiştir.

$$E = W_i (1/\sqrt{P_{80}} - 1/\sqrt{F_{80}}) \quad (3.3)$$

burada,

E: Enerji tüketimi (kWh/t).

F: Beslenen cevherin %80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron).

P: Ürünün %80'inin geçtiği elek açıklığı (mikron).

W_i: İş indeksi (kWh/t).

İş indeksi öğütülecek cevherin yapısına bağlı olarak değişen, malzemenin öğünebilirliği ile alakalı bir değerdir [22]. Bond, iş indeksi belirlemeye yönelik bir

deney yöntemi önermiştir. Bu yöntem günümüzde hala malzemelerin öğünme karakteristiklerinin belirlenebilmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yönteme göre –3.36 mm boyutuna indirilmiş olan malzemenin elek analizi yapılır. Daha sonra 1000 cc'lik bir kabın 700 cc'lik kısmı test numunesi ile titreşimli bir sistem vasıtasıyla sıkıştırılarak doldurulur. Deneyde kullanılacak bu 700 cc'lik malzemenin ağırlığı bulunur. Bilyaların toplam ağırlığı 20.125 kg.'dır. Değirmenin dönüş hızı ise 70 d/d 'dır. Hazırlanan numune Bond değirmeninde sözü edilen şartlar altında 100 devir döndürülerek kuru olarak öğütülür. Amaç öğütme sonunda, cevherin %28.6'sının –100 mikron boyutuna ulaşabilmesidir. Öğütme sonunda malzeme 100 mikronluk elekten elenerek elek altı miktarı not edilir. Elek altı, miktarı tespit edildikten sonra test harici bırakılır ve deney için hazırlanmış olan malzemedan, deney harici bırakılan bu elek altı malzeme miktarı kadar elek üstüne ilavede bulunulur. Oluşan bu yeni numune 2.deney için Bond değirmenine beslenir. 2. ve daha sonraki deneylerde de ilk deneydeki işlemler yapılır. Deneylere elek altı miktarı %28.6 civarında sabitleninceye kadar devam edilir. Belirli bir sınır içinde bulunan son üç testin öğünebilirlik değerlerinin (gr/devir) aritmetik ortalaması cevherin öğünebilirlik değerini verir. Daha sonra iş indeksi, (3.4)'deki formül yardımıyla hesaplanır [22].

$$W_i = 44.5 / P_i^{0.23} \times G^{0.82} \times (10 / \sqrt{P-10/\sqrt{F}}) \quad (3.4)$$

P_i: Test elek açıklığı (mikron)

G: Öğünebilirlik değeri (gr/devir)

P: Öğütme sonu elde edilen ürünün d₈₀ boyutu (mikron)

F: Deneye Beslenen –3.36 mm boyutundaki malzemenin d₈₀ boyutu (mikron)

3.4.2.4. Holmes Teorisi

Holmes boyut küçültmede harcanan enerjiyi (3.5)'deki şekilde ifade etmiştir.

$$E = W_i [(100/P)^r - (100/F)^r] \quad (3.5)$$

burada,

E: Enerji tüketimi (kWh/t).

F: Beslenen cevher tane boyutu (mikron).

P: Ürün tane boyutu (mikron).

Wi: İş indeksi (kWh/t).

r: Tane inceliğine bağlı olarak artan bir sabit.

r değeri tane inceliği arttıkça büyüdüğünden (3.5)'deki eşitliği öğütmede uygulamak oldukça zordur. Bu yasa basit kırma devreleri için uygulanabilir.

Endüstriyel uygulamalarda Kick teorisinin daha ziyade kırmada, Bond teorisinin bilyalı ve çubuklu değirmenlerde ve Rittinger teorisinin de ince öğütmede uygulanabilir olduğu gözlemlenmiştir [19].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde öncelikle hammadde öğütme kademesi (farin) ile ilgili besleme boyutu, bilya yüklemesi ve bilya kompozisyonu optimizasyonu için yapılan deneyler yer almaktadır. Daha sonra çimento öğütme kademesinde kullanılan klinker ve katkı maddeleriyle yapılan deneyler sırasıyla verilmiştir.

4.1. Malzeme ve Yöntem

Deneylere esas olan numune LAFARGE ASLAN ÇİMENTO'ya ait Kocaeli/Darıca bölgesindeki ocaklardan ve fabrikadan temin edilen yüksek ve düşük silis içerikli iki tip Marn (YSM,DSM), Kireçtaşı, Klinker, Curuf, Tras ve Alçıtaşıdır. İ.T.Ü Maden Fakültesi Cevher ve Kömür Hazırlama Ana Bilim Dalına getirilen numunelerin öncelikle tartımları yapılmıştır. İri boyutta olan malzemeler iki kademe çeneli kırıcıdan geçirilmiş ve daha sonra numune azaltma yöntemiyle 15'er kg'lık miktarları Bond iş indeksi deneyi için ayrılmıştır. Geri kalan miktarlar ise öğütme deneylerinde kullanılmak üzere ayrılmıştır.

4.1.1. Deneylerde Kullanılan Aygıtlar

Deneylerde, çapı 30.5 cm ve boyu 30.5 cm olan standart Bond değirmeni, çapı 19,4 cm. ve boyu 17,3 cm. olan laboratuvar tipi bilyalı-aktarmalı değirmen, çeşitli boyutlardaki standart deney elekleri ve mikroskop kullanılmıştır. Bond formülünden yararlanarak harcanan enerjilerin teorik olarak bulunmasının yanında, besleme boyutunun, bilya yüklemesi ve kompozisyonunun etkisinin araştırıldığı deneylerde, standart Bond değirmenine takılan bir elektrik sayacı sayesinde, öğütme esnasında harcanan fiili enerjiler de bulunmuştur.

4.1.2. Yöntem

Hammadde öğütme kademesinde öncelikle malzemelerin Bond iş indeksleri bulunmuştur. Daha sonra -9 mm, -5,6 mm, -3,36 mm ve -1,68 mm boyutlarında olacak şekilde 4 farklı besleme boyutu, %26, %30, %34, %38 ve %42 olacak şekilde

5 farklı bilya yüklemesi ve 1-1-1-1, 1-2-1-2, 2-1-2-1, 1-1-2-2, 2-2-1-1, 1-2-4-8 ve 8-4-2-1 olacak şekilde 7 farklı bilya kompozisyonu kullanılarak öğütme deneyleri yapılmıştır. Farklı kompozisyon öğütmelerinde kullanılan bilya çapları sırasıyla 4,45 cm, 2,97 cm, 1,91 cm ve 1,55 cm'dir. Örneğin 1-2-1-2 kompozisyonu 4,45 cm'lik bilyalardan 1 birim, 2,97 cm'lik bilyalardan 2 birim, 1,91 cm'lik bilyalardan 1 birim ve 1,55 cm'lik bilyalardan da 2 birim kullanıldığını göstermektedir. Farklı besleme boyutu öğütme deneylerinde, öğütme süresi 350'şer devir/dak yani 5'şer dakika olarak alınmış, bilya yüklemeleri ise standart bond bilya yüklemesi olarak seçilmiştir. (Tablo 4.1). Farklı bilya yüklemeleri ve kompozisyonlarında ise besleme boyutları -3,36 mm ve öğütme süreleri 350 dev/dak. olarak alınmıştır. Bilya kompozisyonu denemelerinde bilya yüklemesi %38 olarak seçilmiştir.

Çimento öğütme kademesinde ise öncelikle kireçtaşı, klinker, curuf, tras ve alçıtaşının ayrı ayrı Bond iş indeksleri bulunmuştur. Daha sonra piyasada kullanılan bir kompoze çimento esas alınarak bir karışım hazırlanmış ve bu karışımın da Bond iş indeksi bulunmuştur. Bulunan bu değerler karşılaştırılarak, malzemelerin ayrı ayrı ve beraber öğütülmeleri durumunda harcaacakları enerji hakkında bir yorum yapılmaya çalışılmıştır.

Son olarak laboratuvar tipi bilyalı aktarmalı değirmende %35 bilya yüklemesi ve 20 dakikalık öğütme sürelerinde klinker, kireçtaşı, curuf, alçıtaşı, tras ve karışım numunelerine öğütme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra Klinker ve curufun %90-%10, %70-%30 ve %50-%50 karışım oranlarında karıştırılması sonucu elde edilen numunelere de aynı şartlarda öğütme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen ürünlere elek analizi yapılmıştır. Karışımların öğütülmesi sonucu elde edilen her bir boyut grubuna, mikroskop altında tane sayımı yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, öğünebilirlikleri farklı olan malzemelerin birlikte öğünmeleri durumundaki davranış farklılıkları saptanmıştır.

4.1.3. Hammadde Öğütme Deneyleri

Bu deneyin yapılmasındaki amaç, çimento üretimindeki bilyalı değirmenler için optimum besleme boyutunu, bilya yüklemesini ve kompozisyonunu bularak, tek bölmeli ve çimento üretiminde halihazırda kullanılan bilya yükleme oranlarına göre daha fazla bilya yüklemesine sahip bir bilyalı değirmenin, enerji tasarrufu açısından vereceği sonucu görebilmektir.

Bunun için öncelikle iki tip marn'ın (YSM ve DSM) iş indeksleri standart Bond deneyine göre bulunmuştur. Daha sonra bu 2 farklı marn uygun bir karışım oranında harmanlanarak (%60 DSM+%40 YSM) kullanılmıştır. Öğütme deneyleri 4 farklı boyutta, 5 farklı bilya yüklemesinde ve 7 farklı bilya kompozisyonunda yapılmıştır. Kullanılan numunelerin kimyasal analiz sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: YSM ve DSM Kimyasal Analiz Sonuçları.

Malzeme	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
YSM	41,68	20,32	4,74	1,68	0,93	0,47	0,44	0,34	31,95
DSM	48,61	11,84	2,51	0,89	0,93	0,10	0,44	0,10	36,83

4.1.3.1. Standart Bond İş İndeksi Deneyleri

Bond deneyi için ayrılan YSM ve DSM numuneleri 3.36 mm'lik elekten elendikten sonra +3,36 mm'lik bölüm konili ve merdaneli kırıcı kullanılarak -3.36 mm boyutuna getirilmiştir. Numunelerin elek analizi yapıldıktan sonra numune azaltma yöntemiyle, 700 cc'lik hacmi dolduran miktar ayrılmış ve öğütme deneyi başlatılmıştır.

Bu deneyde standart Bond deneyinin yerine, basitleştirilmiş bir yöntem olan ve başlangıç devir sayısını bir yaklaşımla bularak aynı sonuca daha hızlı ve verimli bir şekilde ulaşan yöntem izlenmiştir [16]. Bu yöntemle göre başlangıç devir sayısı aşağıdaki formül yardımıyla bulunmaktadır. Test elek açıklığı 150 mikron olarak kabul edilmektedir. Başlangıç devir sayısı (4.1) ile bulunmaktadır.

$$R_1 = (C - P_B) / NWP \quad (4.1)$$

R_1 : Başlangıç devir sayısı

C: İstenilen Ürünün Ağırlığı = 700 cc'lik hacmin oluşturduğu miktar x 0.286 = (%250 devreden yükle başlangıçta belirlenmiş elekten değirmen içindeki malzemenin öğütme sonunda %28.6'sının geçmesi düşünülerek saptanmıştır).

P_B : Beslenen malzemedeki 150 mikron altı malzeme miktarı.

NWP (Net Weight of Product) : 150 mikron altına geçen malzeme miktarı / 10.

Deney, bu yöntemle göre hesaplanan devir sayısını kullanarak başlatılmıştır. Bond değirmeninde hesaplanan devir kadar döndürülerek öğütülen cevher, 150 mikronluk elekten elenmiş ve elek altı miktarı kaydedilmiştir. Bu miktardan başlangıçtaki elek altı miktarının çıkarılıp, çıkan sonucun devir sayısına bölünmesi suretiyle ilk öğünelirlik değeri bulunmuştur. Daha sonra, kaydedilen elek altı miktarı deney harici bırakılmış ve halihazırda bulundurulmuş numuneden, deney harici bırakılan elek altı miktarı kadar cevher, elek üstünde kalan cevhere eklenmiştir. Bu eklenen cevherle birlikte gelen 150 mikron altı malzeme miktarı bulunur. Artık 2. devir sayısının hesaplanmasında bu değeri kullanılacaktır. Deney öğünelirlik değeri sabit bir değere yaklaşıncaya kadar devam etmiş ve son üç deneyin öğünelirlik değeri aritmetik ortalaması deneyin öğünelirlik değeri olarak kabul edilmiştir. Elde edilen verilerin, yukarıda belirtilen iş indeksi formülüne uygulanmasıyla malzemelerin iş indeksleri bulunmuştur. Tablo 4.2’de standart Bond değirmeninde kullanılan bilya yüklemesi, Şekil 4.1’de ise standart Bond değirmeni görülmektedir.

Tablo 4.2: Standart Bond Değirmeninde Kullanılan Bilya Miktarı ve Boyutu

Bilya Çapı (mm)	Bilya Sayısı
44.45	43
29.72	67
25.40	10
19.05	71
15.50	94



Şekil 4.1: Standart Bond Değirmeni

İş indeksi deneylerinde kullanılan malzemelerin beslenen ve ürün boyut elek analizleri Tablo A.1-4 ve Şekil A.1-4’de verilmiştir. Bond deneyi tabloları ise Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de verilmiştir. Bulunan iş indeksi değerleri ise Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.3: YSM Bond Deneyi Tablosu

Deney No	Devir Sayısı (R)	Deney -150 Ürün	Sonu mikron Miktarı	Beslenen İçerisindeki -150 mikron Miktarı (gr.)	Numune -150 mikron Miktarı (gr.)	PB-FB	Öğünebilme Değeri (PB-FB)/R
1	202	379		111,403		267,597	1,325
2	209	320		38,279		281,721	1,348
3	210	304		32,320		271,680	1,294
4	220	317		30,704		286,296	1,301
5	218	348		32,017		315,983	1,449
6	193	353		35,148		317,852	1,647
7	170	313		35,653		277,347	1,631
8	174	315		31,613		283,387	1,629
9	174	320		31,815		288,185	1,656
10	171	312		32,320		279,680	1,636
						Ortalama	1,640

Tablo 4.4: DSM Bond Deneyi Tablosu

Deney No	Devir Sayısı (R)	Deney -150 Ürün	Sonu mikron Miktarı	Beslenen Numune İçerisindeki -150 mikron Miktarı (gr.)	PB-FB	Öğünebilme Değeri (PB-FB)/R
1	155	349		132,645	216,355	1,396
2	198	341		41,706	299,295	1,512
3	183	340		40,750	299,251	1,635
4	169	325		40,630	284,370	1,683
5	166	315		38,838	276,163	1,664
6	168	313		37,643	275,358	1,639
7	171	325		37,404	287,597	1,682
8	166	323		38,838	284,163	1,712
9	163	316		38,599	277,402	1,702
10	165	317		37,762	279,238	1,692
					Ortalama	1,702

Tablo 4.5: YSM ve DSM Bond İş İndeksleri

Malzeme	Beslenen d80 (mikron)	Ürün d80 (mikon)	Gbp (Öğünebilme Değeri)	İş İndeksi (kWh/t)
YSM	2337	102	1,64	11,96
DSM	2000	88	1,702	10,79

Görüldüğü gibi, yüksek silis içerikli malzemenin iş indeksi daha büyüktür. Bu iki malzemenin %60 DSM ve %40 YSM oranlarında karıştırılması sonucu elde edilen malzemenin hesaben bulunan iş indeksi ise 11,26 kWh/t'dur.

4.1.3.2. Besleme Boyutunun Etkisi

4 farklı besleme boyutunda yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler Tablo 4.6’da verilmiştir. Buna göre, besleme boyutu küçüldükçe boyut küçültme oranlarının azaldığı görülmüştür. Boyut küçültme oranı ve sarf edilen enerji açısından en uygun besleme boyutunun -3,36 mm olduğu görülmüştür. Beslenen malzemelerin ve öğütme sonucunda oluşan malzemelerin elek analizleri Tablo A.5-12, elek altı eğrileri ise Şekil A.5-12’de görülebilir.

Tablo 4.6: Farklı Besleme Boyutlarındaki Öğütme Deneylerinin Sonuçları

BOYUT	Öğütme Süresi (Dakika)	d50 (mm)		d80 (mm)		Boyut Küçültme Oranı	Bond Hesabı (kWh/t)	Sayaç Okuması (kWh/t)
		Beslenen	Ürün	Beslenen	Ürün			
-9 mm	5	3,99	1,23	7,54	4,02	1,88	0,48	1,75
-5,6 mm	5	1,92	0,74	4,02	2,48	1,62	0,49	1,72
-3,36 mm	5	1,16	0,56	2,21	1,55	1,43	0,46	1,72
-1,68 mm	5	0,55	0,3	1,09	0,8	1,36	0,57	1,70

4.1.3.3. Bilya Yüklemesinin Etkisi

5 farklı bilya yüklemesinde yapılan öğütme deneyleri sonucu elde edilen veriler Tablo 4.7’de verilmiştir. Bilya kompozisyonu standart Bond kompozisyonuna bağlı kalacak şekilde bilya miktarı, değirmen iç hacminin %26, %30, %34, %38 ve %42’si olacak şekilde artırılmıştır. Ürün boyutları ve sarf edilen enerjiler dikkate alınırsa, en uygun bilya yüklemesinin %38 olduğu görülmektedir. Yapılan bu ilk deneyler dizisinde öğütme süresi sabit alınmak suretiyle bir karşılaştırma yapılabilmektedir. Daha sonra çimentoda kullanılan ürün boyutları da dikkate alınarak, bir de sabit bir boyuta ulaşabilme amaçlı deneyler yapılmıştır. Hedef boyut $d_{80}=105$ mikron olarak belirlenmiştir. Tablo 4.8’de deney sonuçları görülmektedir. Bu deneyler sonucunda, %38’lik bilya yüklemesinin optimum yükleme oranı olduğu doğrulanmıştır. Sabit öğütme süresinde yapılan deneyler için beslenen ve ürün numunelerinin elek

analizleri Tablo A.13-18, elek altı eğrileri ise Şekil A.13-18’de görülmektedir. Sabit boyuta ulaşabilme amaçlı yapılan deneyler sonucundaki elek analizleri Tablo A.4.19-23, elek altı eğrileri ise Şekil A.19-23’de görülmektedir.

Tablo 4.7: Farklı Bilya Yüklemelerindeki Öğütme Deneylerinin Sonuçları

Bilya Yüklemesi (%)	Öğütme Süresi (Dakika)	d50 (mm)		d80 (mm)		Bond Hesabı (kWh/t)	Sayaç Okuması (kWh/t)
		Beslenen	Ürün	Beslenen	Ürün		
26	5	0,98	0,45	1,98	1,62	0,27	1,70
30	5	0,98	0,37	1,98	1,16	0,78	1,70
34	5	0,98	0,36	1,98	1,14	0,80	1,72
38	5	0,98	0,28	1,98	0,88	1,27	1,72
42	5	0,98	0,29	1,98	0,90	1,22	1,78

Tablo 4.8: 105 Mikron Altı Hedefine Göre Farklı Bilya Yüklemelerindeki Öğütme Deneylerinin Sonuçları

Bilya Yüklemesi (%)	Öğütme Süresi (Dakika)	105 Mikron Altına Geçen Malzeme Miktarı (%)	Sayaç Okuması (kWh/t)	Harcanan Fiili Güç (kW)
26	69	81,23	1,7	1,96
30	60	80,33	1,7	1,70
34	51	78,08	1,72	1,46
38	45	81,37	1,72	1,29
42	45	80,97	1,78	1,34

4.1.3.4 Bilya Kompozisyonunun Etkisi

Standart Bond değirmeninde 7 farklı bilya kompozisyonunda deney yapılmıştır. Her bir kompozisyonda öğütme süresi 5 dakika olarak alınmıştır. Bilya yüklemesi ise bir

önceki deney sonucunda optimum değer olarak saptanan, %38 olarak seçilmiştir. Deneylerde farklı çaptaki 4 cins bilya kullanılmıştır. Bu bilyaların çapları sırasıyla 4,45 cm, 2,97 cm, 1,91 cm ve 1,55 cm'dir. Bilya kompozisyonları 1-1-1-1 gibi rakamlarla ifade edilmiştir. İlk sıradaki rakam en büyük çaplı bilyanın, son sıradaki rakam ise en küçük çaplı bilyanın diğerlerine göre kullanılma oranını temsil etmektedir. Örneğin 1-2-1-2 kompozisyonu 4,45 cm'lik bilyalardan 1 birim, 2,97 cm'lik bilyalardan 2 birim, 1,91 cm'lik bilyalardan 1 birim ve 1,55 cm'lik bilyalardan da 2 birim kullanıldığını göstermektedir. Deney sonuçlarına göre en uygun kompozisyonların 2-1-2-1 ve 2-2-1-1 olduğu görülmüştür. Tablo 4.9'da her bir kompozisyon için, beslemedeki ve öğütme sonucunda ulaşılan d_{50} , d_{80} boyutları ile sarf edilen enerjiler görülmektedir. Tablo A.24'de deneye beslenen numunenin elek analizi ve Şekil A.24'de deneye beslenen numunenin elek altı eğrisi verilmiştir. Şekil A.25'de ise her bir kompozisyon için, deney sonucu ulaşılan elek altı eğrileri birarada gösterilmiştir.

Tablo 4.9: Farklı Bilya Kompozisyonlarında Yapılan Öğütme Deneylerinin Sonuçları

Bilya Kompozisyonu	Öğütme Süresi (Dakika)	d_{50} (mm)		d_{80} (mm)		Boyut Küçültme Oranı	Bond Hesabı (kWh/t)	Sayaç Okuması (kWh/t)
		Beslenen	Ürün	Beslenen	Ürün			
1-1-1-1	5	1,02	0,47	2,09	1,43	1,5	0,51	1,70
1-2-1-2	5	1,02	0,45	2,09	1,4	1,5	0,55	1,70
2-1-2-1	5	1,02	0,43	2,09	1,31	1,6	0,65	1,72
1-1-2-2	5	1,02	0,54	2,09	1,52	1,4	0,43	1,72
2-2-1-1	5	1,02	0,41	2,09	1,32	1,6	0,64	1,72
1-2-4-8	5	1,02	0,52	2,09	1,61	1,3	0,34	1,72
8-4-2-1	5	1,02	0,51	2,09	1,47	1,4	0,47	1,72

4.1.4. Çimento Öğütme Kademesi

Bu kademedede hem Bond değirmeni hem de laboratuvar tipi bilyalı değirmen kullanılarak öğütme deneyleri yapılmıştır. İlk olarak malzemelerin iş indeksleri bulunmuştur. Buradaki asıl amaç, klinkerin ve katkı maddelerinin iş indekslerinin bulunması suretiyle, bu malzemelerin kullanılma oranlarının ve şekillerinin

öğütmede sarf edilen enerjiye olan etkisini incelemektir. Endüstride genel olarak klinker ve katkı maddeleri beraber öğütülmektedir. Bu çalışmada her malzemenin ayrı ayrı iş indeksleri bulunmuş, ayrıca uygun bir “kompozit çimento” karışımının da iş indeksi bulunarak, bir karşılaştırma yapma olanağı sağlanmıştır. Laboratuvar tipi bilyalı aktarmalı değirmen öğütmeleri sonucunda da, malzemelerin öğünme karakteristikleri hakkında bilgiler elde edilmiştir.

4.1.4.1. Bond İş İndeksi Deneyleri

Bond deneyine beslenen malzemelerin elek analizleri Tablo A.25-30, elek altı eğrileri ise Şekil A.26-31’de, Bond deneyi ürün elek analizleri Tablo A.31-36, elek altı eğrileri ise Şekil A.32- 37’de görülebilir. Bond deneyi tabloları ise Tablo 4.10-12’de görülebilir.

Tablo 4.10: Kireçtaşı ve Klinker’in Bond Deneyi Tabloları

Deney No	Devir Sayısı (R)		Deney Sonu -150 mikron Ürün Miktarı (gr.) PB		Beslenen Numune İçerisindeki -150 mikron Miktarı (gr.) FB		PB-FB		Öğünebilme Değeri (PB-FB)/R	
	Kireçtaşı	Klinker	Kireçtaşı	Klinker	Kireçtaşı	Klinker	Kireçtaşı	Klinker	Kireçtaşı	Klinke
1	266	148	388	317	111,587	150,969	276,413	166,031	1,039	1,122
2	306	266	379	388	35,114	40,386	343,886	347,614	1,124	1,307
3	283	221	375	378	34,300	49,431	340,701	328,569	1,204	1,487
4	265	196	336	344	33,938	48,157	302,063	295,843	1,141	1,509
5	282	196	379	330	30,408	43,826	348,592	286,174	1,232	1,460
6	258	203	374	354	34,300	42,042	339,701	311,958	1,317	1,537
7	242	191	345	329	33,847	45,100	311,153	283,900	1,286	1,486
8	250	200	349	339	31,223	41,915	317,778	297,085	1,271	1,485
9	253	199	354	335	31,585	43,189	322,416	291,811	1,274	1,466
10	252	202	352	333	32,037	42,679	319,963	290,321	1,270	1,437
ORTALAMA									1,272	1,463

Tablo 4.11: Curuf ve Tras'ın Bond Deneyi Tabloları

Deney No	Devir Sayısı (R)		Deney Sonu -150 mikron Ürün Miktarı (gr.) PB		Beslenen Numune İçerisindeki -150 mikron Miktarı (gr.) FB		PB-FB		Öğünebilme Değeri (PB-FB)/R	
	Curuf	Tras	Curuf	Tras	Curuf	Tras	Curuf	Tras	Curuf	Tras
1	951	108	489	313	27,619	119,825	461,381	193,175	0,485	1,78
2	567	123	464	270	13,399	41,034	450,601	228,966	0,795	1,86
3	347	121	372	247	12,714	35,397	359,286	211,603	1,035	1,74
4	269	131	314	269	10,193	32,382	303,807	236,618	1,129	1,80
5	248	125	304	255	8,604	35,266	295,396	219,734	1,191	1,75
6	235	130	291	259	8,330	33,431	282,670	225,570	1,203	1,73
7	233	131	294	261	7,973	33,955	286,027	227,045	1,228	1,73
8	228	131	287	262	8,056	34,217	278,944	227,783	1,223	1,73
9	229	-	288	-	7,864	-	280,136	-	1,223	-
10	229	-	289	-	7,891	-	281,109	-	1,228	-
ORTALAMA									1,225	1,73

Tablo 4.12: Alçıtaşı ve Karışım'ın Bond Deneyi Tabloları

Deney No	Devir Sayısı (R)		Deney Sonu -150 mikron Ürün Miktarı (gr.) PB		Beslenen Numune İçerisindeki -150 mikron Miktarı (gr.) FB		PB-FB		Öğünebilme Değeri (PB-FB)/R	
	Alçıtaşı	Karışım	Alçıtaşı	Karışım	Alçıtaşı	Karışım	Alçıtaşı	Karışım	Alçıtaşı	Karışım
1	168	193	308	358	116,914	115,245	191,086	242,755	1,137	1,258
2	236	222	315	321	34,003	37,304	280,997	283,696	1,191	1,278
3	225	221	286	301	34,776	33,448	251,224	267,552	1,117	1,211
4	243	235	295	370	31,574	31,364	263,426	338,636	1,084	1,441
5	249	193	325	314	32,568	38,554	292,432	275,446	1,174	1,427
6	227	199	356	316	35,880	32,719	320,120	283,281	1,410	1,424
7	187	199	331	329	39,302	32,927	291,698	296,073	1,560	1,488
8	171	190	313	323	36,542	34,282	276,458	288,718	1,617	1,520
9	166	186	303	316	34,555	33,657	268,445	282,343	1,617	1,518
10	167	187	304	317	33,451	32,927	270,549	284,073	1,620	1,519
ORTALAMA									1,618	1,519

Deneyler sonucunda bulunan iş indeksleri Tablo 4.13.'de görülmektedir. Buna göre, iş indeksi en büyük olan malzeme 19,52 kWh/t ile curuf, en küçük olan ise 12,11 kWh/t ile alçıtaşıdır. Klinker'in 13,85 kWh/t olan iş indeksi değeri, karışımın 13,59 kWh/t'luk iş indeksi değerine yakın bir değerdir.

Tablo 4.13: Klinker ve Katkı Malzemelerinin Bulunan İş İndeksleri

Malzeme	Beslenen d80 (mikron)	Ürün d80 (mikron)	Öğünebilme Değeri (Gbp)	İş İndeksi (kWh/t)
Kireçtaşı	2546	94	1,272	13,85
Klinker	2308	112	1,463	13,96
Curuf	1364	129	1,225	19,52
Trass	1909	108	1,737	12,19
Alçıtaşı	2308	102	1,618	12,11
Karışım	2000	109	1,519	13,59

Tablo 4.14'de Klinkerin ve katkı maddelerinin karışım içerisindeki oranlarına göre aritmetik olarak bulunan iş indeksi değeri görülmektedir. Buna göre, karışımın hesaben bulunan iş indeksi değeriyle, deneysel olarak bulunan iş indeksi değeri arasında 1,31 kWh/t'luk bir fark vardır. Bu sonuçtan yola çıkarak, birlikte öğütmenin ayrı ayrı öğütme göre daha az enerji sarf edeceği yorumu yapılabilir.

Tablo 4.14: Malzeme Katkı Oranları ve Harcanan Enerji

Malzeme	Kullanılan Karışım Kompozit Çimentodaki Katkı Oranları (%)	Karışım Oranı ve İş İndeksine Göre Tüketilen Enerji (kWh/t)
Kireçtaşı	4,5	0,62
Klinker	49	6,84
Curuf	24,3	4,74
Trass	18,3	2,23
Alçıtaşı	3,9	0,47
Toplam	100	14,90

BULUNAN KARIŞIM İŞ İNDEKSİ

13,59 kWh/t

AYRI AYRI ÖĞÜTME SONUCUNDA İSE HESABEN

14,90 kWh/t

FARK

1,31 kWh/t

4.1.4.2. Laboratuvar Tipi Bilyalı Aktarmalı Değirmen Deneyleri

Bu deneyde klinker ve 4 farklı katkı maddesi sabit şartlar altında (20 Dakika, %35 bilya yüklemesi) laboratuvar tipi bilyalı aktarmalı değirmende öğütme işlemine tabii tutulmuştur. Daha sonra klinker+katkı maddeleri uygun bir “kompoze çimento” sağlayacak oranlarda karıştırılmış ve bu karışım da aynı şartlar altında öğütme işlemine tabii tutulmuştur. Sonuç olarak, malzemelerin tek başlarına ve karışım içerisindeki elek analizlerinden yararlanarak öğünme karakteristiklerindeki, dolayısıyla enerji sarfiyatındaki değişim saptanmıştır. Daha sonra yalnızca klinker ve curuf, %90-10, %70-30 ve %50-50 olacak şekilde 3 farklı oranda karıştırılarak, aynı şartlar altında öğütmeler yapılmıştır. Değişen oranlara bağlı olarak enerji sarfiyatındaki farklılıklar saptanmıştır. Tablo A.37-42’de ürünlerin elek analizi, Şekil A.38-43’de ise ürünlerin elek altı eğrileri verilmiştir. Ayrıca Tablo A.43-45’de klinker+curuf’un ürün elek analizleri ve Şekil A.44-46’de de klinker+curuf’un elek altı eğrileri verilmiştir. Tablo 4.15’de Ürünlerin d_{50} , d_{80} boyutları ve Bond teorisine göre sarf ettikleri enerjiler görülmektedir. Buna göre karışım ile klinkerin sarf ettikleri enerji birbirine yakındır.

Tablo 4.15: Laboratuvar Tipi Bilyalı Öğütme Deneylerinde Sarf Edilen Enerji

Malzeme	Öğütme Süresi (dak.)	d50 (mikron)	d80 (mikron)	Boyut Küçültme Oranı	Sarf Edilen Enerji (kWh/t)
KLİNKER	20	49	141	16,4	8,85
KİREÇTAŞI	20	24	123	20,7	9,74
CURUF	20	85	179	8,3	9,66
TRAS	20	57	153	12,5	7,07
ALÇITAŞI	20	12	107	21,6	9,19
KARIŞIM	20	45	140	14,3	8,45

Tablo 4.16’da ise klinker+curuf sonuçları görülmektedir. Curuf oranının artmasıyla beraber d_{50} ve d_{80} boyutlarının büyüdüğü ve enerji sarfiyatının da arttığı görülmektedir. Klinker ve curuf’un ayrı ayrı öğütme sonuçları ve beraber öğütme sonuçları karşılaştırıldığı zaman %10 ile %30 arasındaki curuf ilavesinin, öğütmeyi olumlu yönde etkileyeceği söylenebilir.

Tablo 4.16: Klinker ve Curuf Karışımı Deneylerinde Sarf Edilen Enerji

Malzeme	Besleme Oranı (%)	Öğütme Süresi (dak.)	d50 (mikron)	d80 (mikron)	Boyut Küçültme Oranı	İş indeksi (kWh/t)	Harcanan Enerji (kWh/t)
KLİNKER	90	20	46	137	16,2	14,52	9,32
CURUF	10						
KLİNKER	70	20	50	143	14,2	15,63	9,60
CURUF	30						
KLİNKER	50	20	53	149	12,3	16,74	9,81
CURUF	50						

Laboratuvar tipi bilyalı aktarmalı tip değirmende, tek başına ve birarada yapılan öğütme sonucunda elde edilen ürünlere elek analizi yapılmıştır. Beraber öğütme sonucu oluşan her bir boyut grubundaki malzeme miktarını bulabilmek için, mikroskop altında tane sayımı yapılmış ve malzemelerin o boyut grubundaki oranları, yüzde olarak bulunmuştur. Daha sonra bu yüzdeler malzemelerin tek başına öğütme sonucu elde edilen, yani orjinal elek analizleriyle karşılaştırılmıştır. Klinker, curuf, tras, kireçtaşı ve alçıtaşıdan oluşan karışım içindeki boyut dağılımları ile tek başlarına, aynı şartlar altında öğütülmeleri sonucu ulaşılan boyut dağılımları, Tablo 4.17-19’da verilmiştir.

Tablo 4.17: Klinker ve Curuf’un Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başlarına Öğütülmeleri Durumundaki Elek Analizleri

Boyut Grubu (mm)	Klinker		Curuf	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100,00	100	100
-0,21+0,150	98,99	98,63	93,98	96,76
-0,15+0,105	92,34	89,41	78,25	83,69
-0,105+0,074	76,61	73,04	59,42	60,20
-0,074	52,82	53,08	41,75	39,97

Tablo 4.18: Tras ve Kireçtaşı’nın Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başlarına Öğütülmeleri Durumundaki Elek Analizleri

Boyut Grubu (mm)	Tras		Kireçtaşı	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100	100	100
-0,21+0,150	97,56	99,53	96,59	99,51
-0,15+0,105	87,80	95,00	84,97	93,37
-0,105+0,074	68,70	88,32	76,35	86,95
-0,074	52,24	79,78	68,54	70,46

Tablo 4.19: Alçıtaşı'nın Karışım Halinde Öğütülmesiyle Tek Başına Öğütülmesi Durumundaki Elek Analizleri

Boyut Grubu (mm)	Alçıtaşı	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100
-0,21+0,150	92,60	99,64
-0,15+0,105	85,60	96,59
-0,105+0,074	79,00	91,29
-0,074	74,40	84,74

Elde edilen sonuçlara göre, klinker ve curuf'un öğünme karakteristikleri, tek başlarına olma durumlarıyla, birden çok malzemeye beraber olma durumlarında pek bir değişiklik göstermemiştir.

Tras, kireçtaşı ve alçıtaşının öğünme karakteristiklerinde, tek başlarına ve diğer malzemelerle olma durumlarına göre değişiklik olduğu saptanmıştır. Buna göre tras, kireçtaşı ve alçıtaşı beraber öğütülme durumunda, tek başlarına öğütülmelerine göre daha küçük boyut gruplarında yoğunlaşmaktadırlar. Bunun nedeni, nispeten daha sert olan klinker ve özellikle curuf'un diğer malzemeler üzerinde, artı bir öğütücü olarak davranması olabilir. Cevher hazırlama teknolojisinde uygun özellikteki cevher tanelerinin öğütücü ortam olarak kullanılabildiği gerçeği bu yaklaşımı desteklemektedir.

Klinker ve curuf'da kayda değer bir değişimin olmaması da diğer malzemelerin bu malzemeler üzerinde öğütme yönünden yeterli derecede etkisinin olmadığını göstermiştir. Buradan beraber öğütmenin daha avantajlı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Yalnızca klinker ve curuf'un karıştırılmasıyla elde edilen numunelerle yapılan öğütme deneyleri sonucunda her bir boyut grubunda kalan klinker ve curuf miktarları ile, tek başlarına öğütülmeleri sonucu ilgili boyut gruplarında kalan miktarlarının karşılaştırılması Tablo 4.20-22'de görülmektedir. Buna göre, curuf miktarının artmasıyla klinker'in öğünebilirliğinde önemli bir değişiklik görülmemiş ancak curuf'un daha küçük boyut gruplarında yoğunlaştığı saptanmıştır.

Tablo 4.20: %90 Klinker + %10 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu

%90 Klinker + %10 Curuf				
Boyut Grubu (mm)	Klinker		Curuf	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100	100	100
-0,21+0,150	98,99	99,34	93,98	97,91
-0,15+0,105	92,34	93,63	78,25	86,89
-0,105+0,074	76,61	80,90	59,42	62,61
-0,074	52,82	55,59	41,75	32,81

Tablo 4.21: %70 Klinker + %30 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu

%70 Klinker + %30 Curuf				
Boyut Grubu (mm)	Klinker		Curuf	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100	100	100
-0,21+0,150	98,99	99,18	93,98	97,90
-0,15+0,105	92,34	91,74	78,25	87,20
-0,105+0,074	76,61	78,41	59,42	68,20
-0,074	52,82	56,48	41,75	45,21

Tablo 4.22: %50 Klinker + %50 Curuf Karışımının Öğütülmesi Sonucu

%50 Klinker + %50 Curuf				
Boyut Grubu (mm)	Klinker		Curuf	
	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Tek Başına Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)	Beraber Öğütme Sonucu Oluşan Toplam Elek Altı (%)
-0,297+0,210	100	100	100	100
-0,21+0,150	98,99	98,79	93,98	97,76
-0,15+0,105	92,34	91,21	78,25	84,50
-0,105+0,074	76,61	76,64	59,42	68,21
-0,074	52,82	60,04	41,75	46,33

5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

- Standart Bond değirmeninde, -9 mm, -5,6 mm, -3,36 ve -1,68 mm besleme boyutlarında yapılan deneyler sonucunda standart Bond değirmeni için optimum besleme boyutunun -3,36 mm olduğu saptanmıştır.
- Standart Bond değirmeninde, değirmen iç hacmine göre %26-30-34-38-42'lik bilya yüklemelerinin, enerji sarfiyatı üzerindeki etkileri araştırılmış ve hem sabit sürelerde yapılan öğütme deneyleri hem de sabit bir boyuta ulaşabilmek için yapılan öğütme deneyleri sonucunda en uygun bilya yüklemesinin %38 olduğu saptanmıştır. Her iki deney dizisinde de %26 bilya yüklemesi en kötü sonucu vermiş ve bilya yükünün artırılmasıyla elde edilen sonuçlar doğru orantılı olarak iyileşmiştir. Bilya yüklemesinin %42 olması durumunda, %38'lik yüklemeye göre sarf edilen enerji de az da olsa bir artış görülmüştür. Buradan en uygun yüklemenin %38-40 arasında olacağı söylenebilir.
- Yapılan deneyler sonucunda en uygun bilya kompozisyonlarının 2 birim 4,45 cm'lik; 1 birim 2,97 cm'lik; 2 birim 1,91 cm'lik ve 1 birim 1,55 cm'lik bilyalarla oluşturulan kompozisyon ile 2 birim 4,45 cm'lik; 2 birim 2,97 cm'lik; 1 birim 1,91 cm'lik ve 1 birim 1,55 cm'lik bilyalarla oluşturulan kompozisyon olduğu görülmüştür.
- Çimento öğütme kademesinde klinker ve katkı maddelerinin ayrı ayrı ve beraber öğütülmeleri durumları ele alınmıştır. Klinker+katkı maddeleri karışımının iş indeksi ile klinker'in iş indeksi değerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Karışımın aritmetik olarak bulunan Bond iş indeksi değeri ile deneysel olarak bulunan Bond iş indeksi değeri arasında 1,31 kWh/t'luk bir fark olduğu saptanmıştır. Bu noktadan hareketle birlikte öğütmenin, ayrı ayrı öğütmeye göre daha avantajlı olmaktadır..
- Klinker+curuf numuneleriyle yapılan deneyler sonucunda, curuf oranının artmasıyla beraber d_{50} ve d_{80} boyutlarının büyüdüğü ve enerji sarfiyatının da arttığı görülmüştür. Klinker ve curuf'un ayrı ayrı öğütme sonuçları ve beraber

öğütme sonuçları karşılaştırıldığı zaman %10 ile %30 arasındaki curuf ilavesinin, öğütmeyi olumlu yönde etkileyeceği görülmüştür.

- Klinker+curuf numuneleriyle yapılan deneyler sonucunda, curuf miktarının artmasıyla klinker'in öğünebilirliğinde önemli bir değişikliğin olmadığı görülmüş ancak curuf'un daha küçük boyut gruplarında yoğunlaştığı saptanmıştır.
- Tras, kireçtaşı ve alçıtaşının öğünme karakteristiklerinde, tek başlarına ve diğer malzemelerle olma durumlarına göre değişiklik olduğu saptanmıştır. Buna göre tras, kireçtaşı ve alçıtaşı beraber öğütülme durumunda, tek başlarına öğütülmelerine göre daha küçük boyut gruplarında yoğunlaşmaktadırlar.
- Halen çimento sanayiinde %26 düzeyinde olan bilya yükünün %38-40'a yükseltilmesi ile öğütmenin daha kısa sürede gerçekleştiği ve enerji sarfında %30'luk azalma olduğu, yapılan bu araştırma sonucunda saptanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Hosten, C., and Avsar, C.**, 1998. Grindability of mixtures of cement clinker and trass, *Cement and Concrete Research*, **28**, 1519-1524.
- [2] **Deniz, V.**, 2002. A study on the specific rate of breakage of cement materials in a laboratory ball mill, *Cement and Concrete Research*, **33**, 439-445.
- [3] **Bouzoubal, N., Zhang, M.H., Bilodeau, A. and Malhotra, V.M.**, 1997. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a portland cement clinker, *Cement and Concrete Research*, **27**, 1861-1874
- [4] **Deniz, V.**, 2003. The effect of mill speed on kinetic breakage parameters of clinker and limestone, *Cement and Concrete Research*, **34**, 1365-1371
- [5] **Tokyay, M.**, 1998. Effect of chemical composition of clinker on grinding energy requirement, *Cement and Concrete Research*, **29**, 531-535
- [6] **Schnatz, R.**, 2004. Optimization of continuous ball mills used for finish-grinding of cement by varying the L/D ratio, ball charge filling ratio, ball size and residence time, *Int. J. Miner. Process.*, **74S**, S55-S63
- [7] **Öner M.**, 2001. Yüksek fırın curuflarının çimento üretiminde kullanımında öğütmeyle ilgili parametrelerin etkilerinin belirlenmesi, *Yerbilimleri*, **23**, 61-69
- [8] **García, I.J., Menéndez, A.M. and Egocheaga, R.J.**, 1999. Influence of gypsum's mineralogical characteristics on its grinding behaviour applied to cement fabrication, *Cement and Concrete Research*, **29**, 727-730
- [9] **Tsivilis, S., Voglis, N. and Photou, J.**, 1999. Technical note a study on the intergrinding of clinker and limestone, *Minerals Engineering*, **12**, 837-840
- [10] Orta Anadolu İhracatçılar Birliği, Rapor No:15, 2000. Çimento Sektörü Raporu, Ankara.
- [11] **Kocataşkın, F.**, 1965. Çimento ve Özellikleri Hakkında Ne Biliyoruz?, İ.T.Ü Gümüşsuyu Matbaası, İstanbul.
- [12] **Yeğinobalı, A.**, 2004. Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi, TÇMB, Ankara

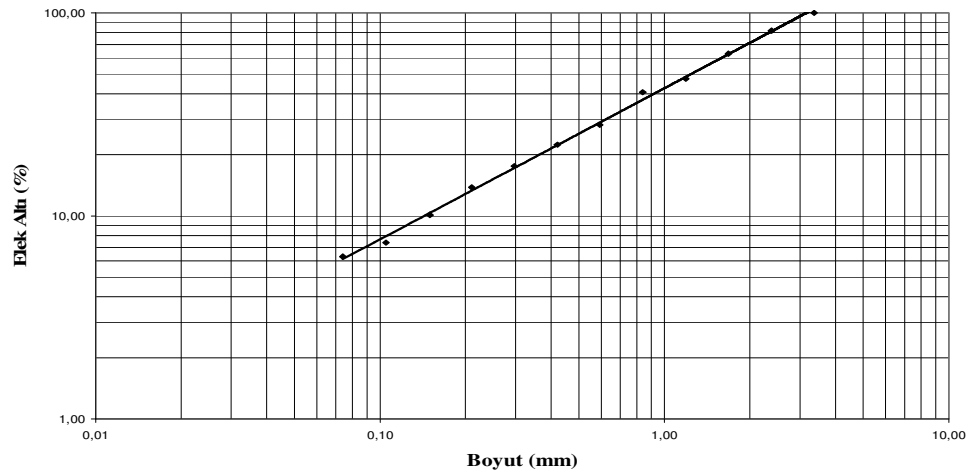
- [13] Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 1996. Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri, Ankara.
- [14] **Yeğinoğlu, A., Ertün, T.**, 2004. Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, TÇMB, Ankara.
- [15] Cembureau Presentation, Technical Publications, 1997. Alternative Fuels in Cement Manufacture - Technical and Environmental Review, Bruxelles, Belgium.
- [16] Cembureau Presentation, Technical Publications, 2000. Best Available Techniques for the Cement Industry, Bruxelles, Belgium.
- [17] **Jankovic A., Valery W. and Davis E.**, 2004. Cement Grinding Optimization, *Minerals Engineering*, **17**, 1071-1085.
- [18] **Kaymaz Y.**, 1990. Cevher Hazırlama, İstanbul
- [19] **Yıldız N.**, 1999. Öğütme, Ankara
- [20] **Tkacova K.**, 1989. Mechanical Activation of Minerals. “Development in Mineral Processing”, New York.
- [21] **Gaudin A.M.**, 1939.. Principles of mineral dressing, New York
- [22] **Wills B.A.**, 1988. Mineral processing technology, Oxford.
- [23] **Fuerstenau D.W. and Abouzeid A.Z.M.**, 2002. The energy efficiency of ball milling in comminution , *International Journal of Mineral Processing*, **67**, 161-185
- [24] Lafarge Technical Group., 1996. Grinding, Centre Technique International, France.
- [25] **Bayraktar T.C.**, 1974.. Cevher Hazırlamada Zenginleştirme Öncesi İşlemler, İstanbul
- [26] **Tuunila R.**, 2000. Optimization of grinding time in a ball mill-attrition bead mill process, Mineral Processing on the Verge of the 21st Century, 8th *International Mineral Processing Symposium*, Antalya, Turkey, October, 2000, 55-58.

- [27] **Köse M. ve Koç M.**, 1990. A Simplified Method of Determining The Bond Work Index, *Proceeding of the III. International Mineral Processing Symposium*, Turkey, September, 1990, 44-54

EKLER

Tablo A.1: Bond Deneyine Beslenen YSM'nin Elek Analizi

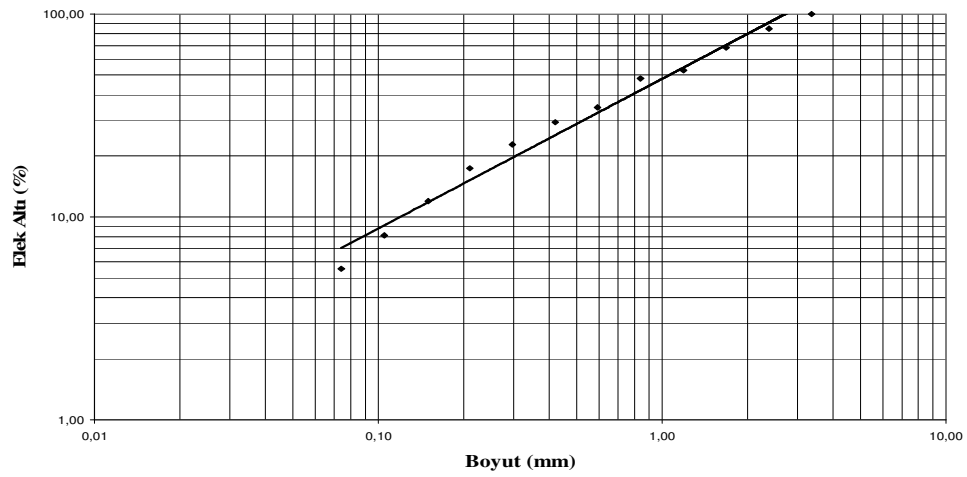
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	18,20	18,20	100,00
-2,38+1,68	18,80	37,00	81,80
-1,68+1,19	15,60	52,60	63,00
-1,19+0,840	6,70	59,30	47,40
-0,840+0,593	12,60	71,90	40,70
-0,593+0,420	5,70	77,60	28,10
-0,420+0,297	4,80	82,40	22,40
-0,297+0,210	3,80	86,20	17,60
-0,210+0,150	3,70	89,90	13,80
-0,150+0,105	2,70	92,60	10,10
-0,105+0,074	1,10	93,70	7,40
-0,074	6,30	100,00	6,30
Toplam	100,00		



Şekil A.1: YSM Bond Deneyine Beslenen Elek Altı Eğrisi

Tablo A.2: Bond Deneyine Beslenen DSM'nin Elek Analizi

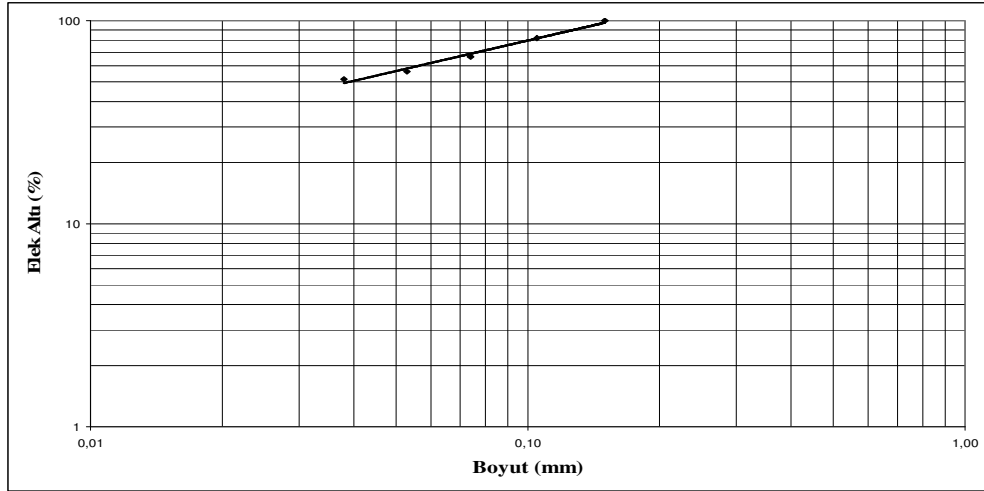
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	$\Sigma E.Ü. (%)$	$\Sigma E.A (%)$
-3,36+2,38	15,36	15,36	100,00
-2,38+1,68	16,36	31,72	84,64
-1,68+1,19	15,36	47,08	68,28
-1,19+0,840	4,84	51,92	52,92
-0,840+0,593	13,37	65,29	48,08
-0,593+0,420	5,41	70,69	34,71
-0,420+0,297	6,54	77,24	29,30
-0,297+0,210	5,41	82,64	22,76
-0,210+0,150	5,41	88,05	17,35
-0,150+0,105	3,84	91,89	11,95
-0,105+0,074	2,56	94,45	8,11
-0,074	5,55	100,00	5,55
Toplam	100,00		



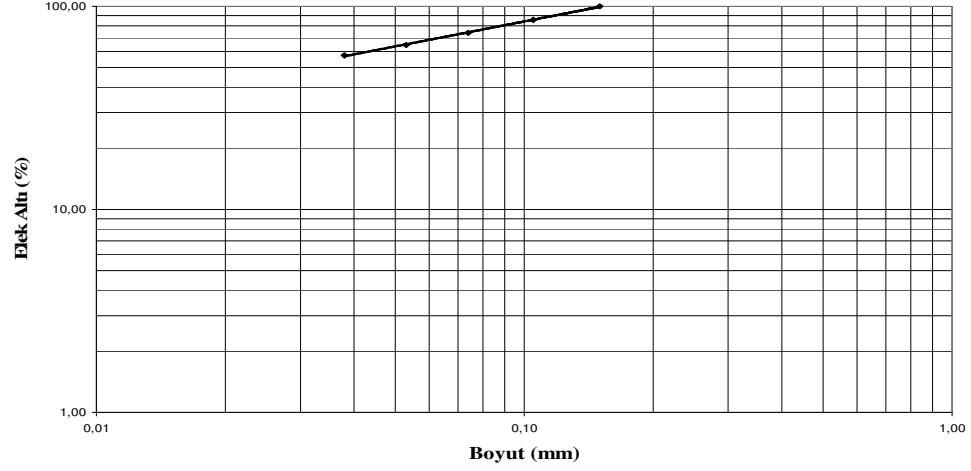
Şekil A.2: DSM Bond Deneyine Beslenen Elek Altı Eğrisi

Tablo A.3: YSM Bond Deneyi Ürün Elek Analizi

Boyut Aralığı (mikron)	Miktar	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	17,92	17,92	100,00
-105+74	15,59	33,51	82,08
-74+53	10,39	43,90	66,49
-53+38	4,67	48,57	56,10
-38	51,43	100,00	51,43
Toplam	100,00		

**Şekil A.3:** YSM Bond Deneyi Ürün Elek Altı Eğrisi**Tablo A.4:** DSM Bond Deneyi Ürün Elek Analizi

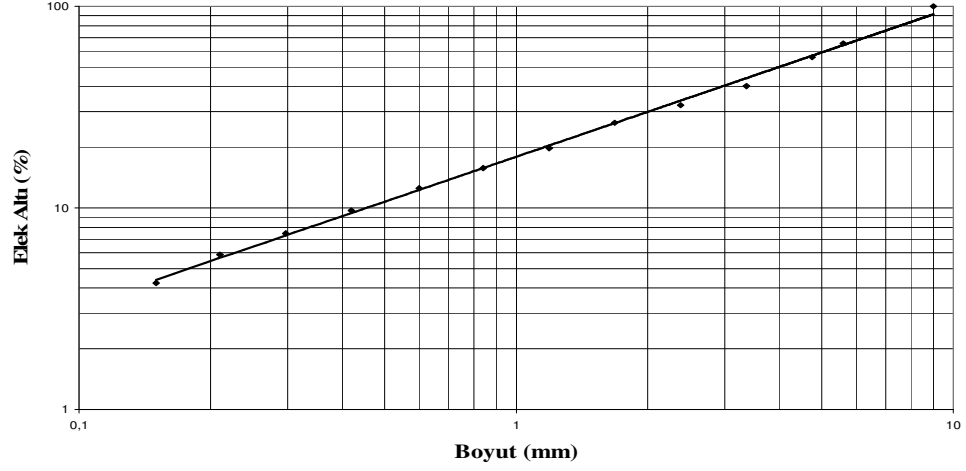
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	14,15	14,15	100,00
-105+74	11,82	25,97	85,85
-74+53	9,64	35,61	74,03
-53+38	7,00	42,61	64,39
-38	57,39	100,00	57,39
Toplam	100,00		



Şekil A.4: DSM Bond Deneyi Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.5: -9 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi

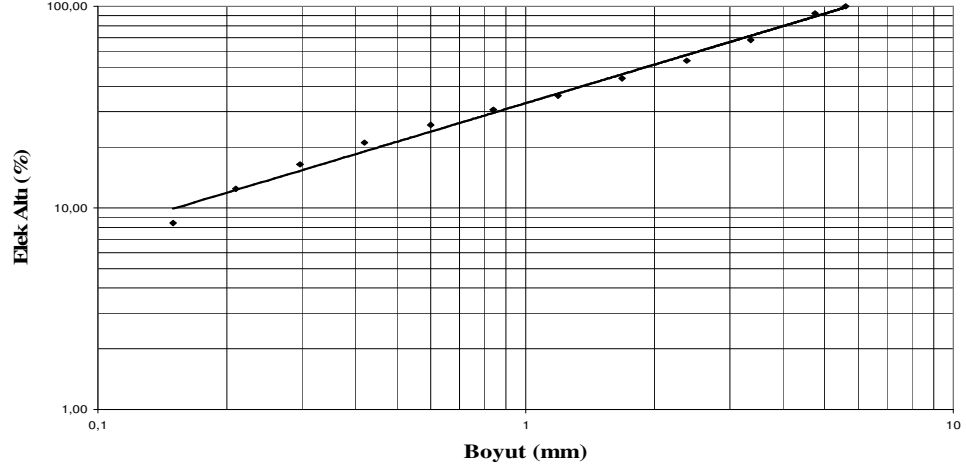
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-9+5,6	34,55	34,55	100
-5,6+4,75	9,49	44	65,45
-4,75+3,36	15,76	60	55,96
-3,36+2,38	7,88	68	40,20
-2,38+1,68	5,86	74	32,32
-1,68+1,19	6,67	80	26,46
-1,19+0,840	4,04	84	19,80
-0,840+0,600	3,23	87	15,76
-0,600+0,420	2,83	90	12,53
-0,420+0,297	2,22	93	9,70
-0,297+0,210	1,62	94	7,47
-0,210+0,150	1,62	96	5,86
-0,150	4,24	100	4,24
Toplam	100,00		



Şekil A.5: -9 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi

Tablo A.6: -5,6 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi

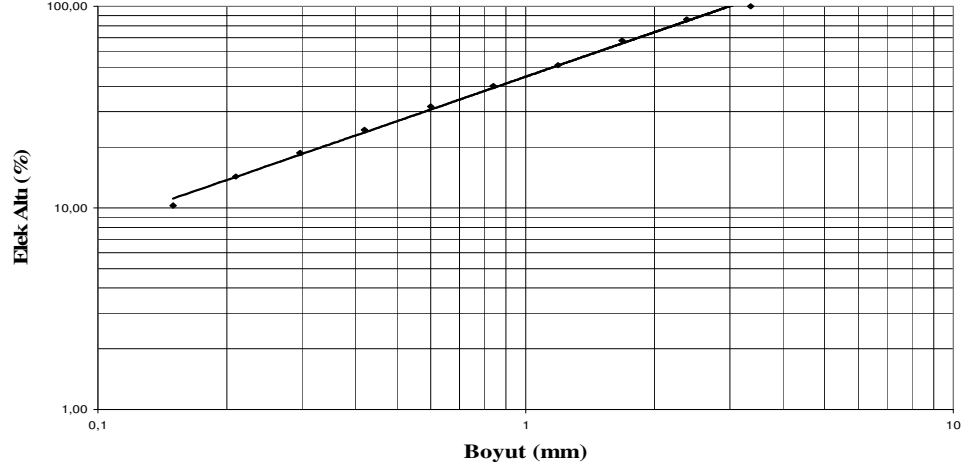
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-5,6+4,75	7,82	7,82	100
-4,75+3,36	24,05	32	92,18
-3,36+2,38	14,43	46	68,14
-2,38+1,68	9,82	56	53,71
-1,68+1,19	7,82	64	43,89
-1,19+0,840	5,41	69	36,07
-0,840+0,600	4,81	74	30,66
-0,600+0,420	4,81	79	25,85
-0,420+0,297	4,61	84	21,04
-0,297+0,210	4,01	88	16,43
-0,210+0,150	4,01	92	12,42
-0,150	8,42	100	8,42
Toplam	100,00		



Şekil A.6: -5,6 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi

Tablo A.7: -3,36 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi

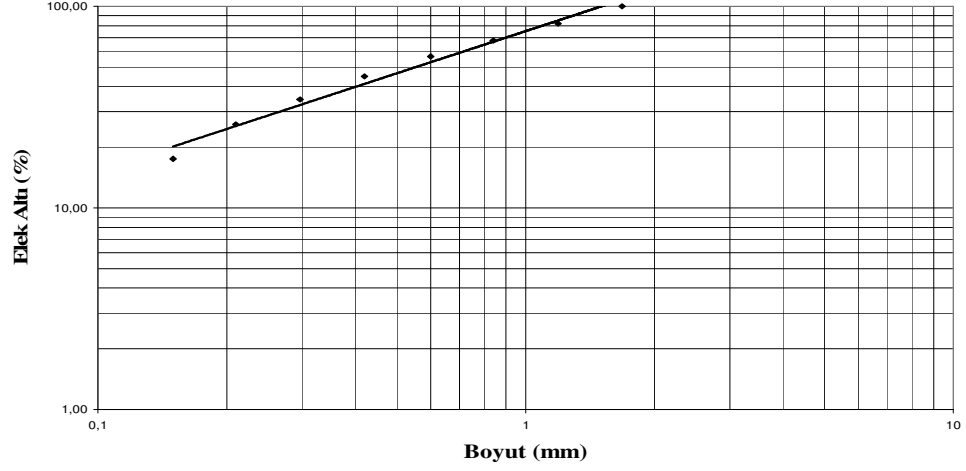
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	14,11	14,11	100
-2,38+1,68	18,15	32	85,89
-1,68+1,19	16,73	49	67,74
-1,19+0,840	10,89	60	51,01
-0,840+0,600	8,27	68	40,12
-0,600+0,420	7,46	76	31,85
-0,420+0,297	5,65	81	24,40
-0,297+0,210	4,44	86	18,75
-0,210+0,150	4,03	90	14,31
-0,150	10,28	100	10,28
Toplam	100,00		



Şekil A.7: -3,36 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi

Tablo A.8: -1,68 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Analizi

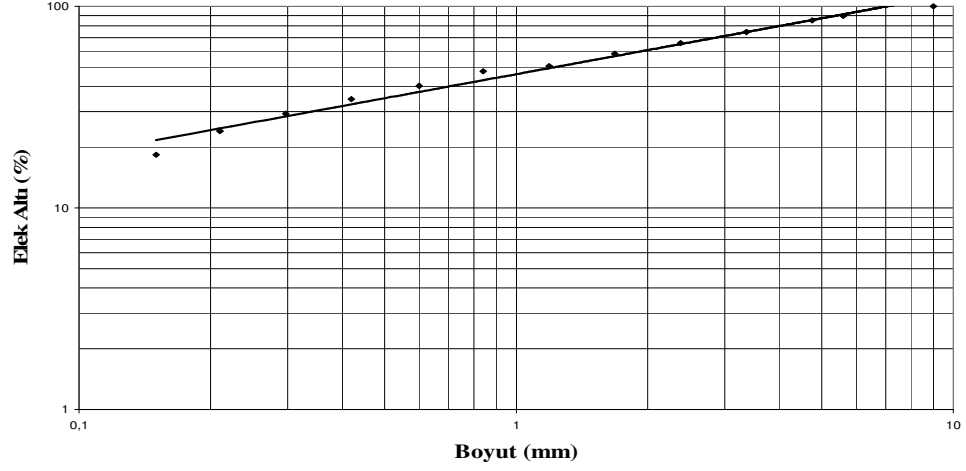
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-1,68+1,19	17,94	17,94	100
-1,19+0,840	14,31	32	82,06
-0,840+0,600	11,29	44	67,74
-0,600+0,420	11,49	55	56,45
-0,420+0,297	10,48	66	44,96
-0,297+0,210	8,47	74	34,48
-0,210+0,150	8,47	82	26,01
-0,150	17,54	100	17,54
Toplam	100,00		



Şekil A.8: -1,68 mm Boyutundaki Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi

Tablo A.9: -9 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi

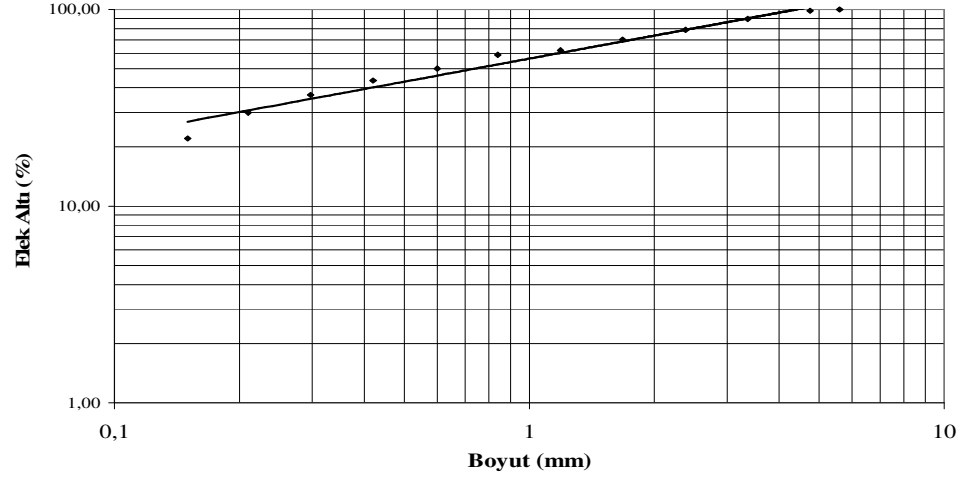
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	$\sum E.\ddot{U}.$ (%)	$\sum E.A$ (%)
-9+5,6	10,36	10,36	100
-5,6+4,75	4,58	15	89,64
-4,75+3,36	10,56	25	85,06
-3,36+2,38	8,96	34	74,50
-2,38+1,68	7,37	42	65,54
-1,68+1,19	7,77	50	58,17
-1,19+0,840	2,79	52	50,40
-0,840+0,600	7,37	60	47,61
-0,600+0,420	5,58	65	40,24
-0,420+0,297	5,38	71	34,66
-0,297+0,210	5,18	76	29,28
-0,210+0,150	5,78	82	24,10
-0,150	18,33	100	18,33
Toplam	100,00		



Şekil A.9: -9 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.10: -5,6 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi

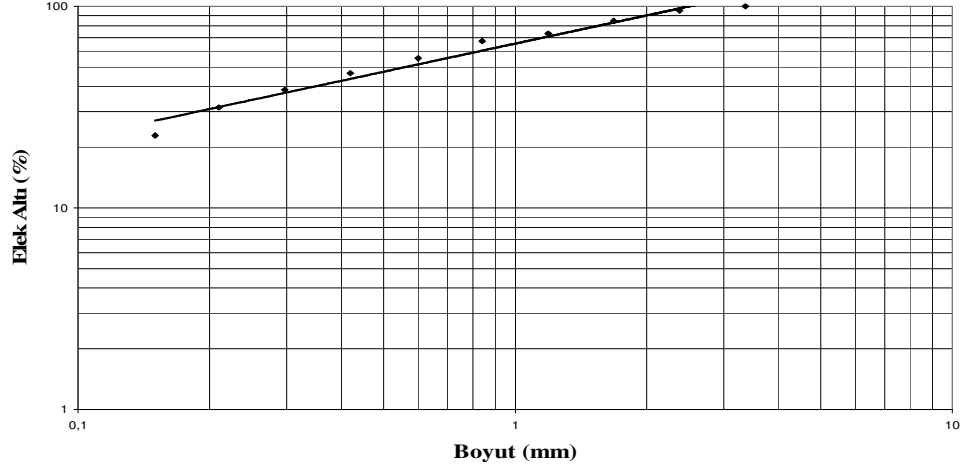
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-5,6+4,75	1,61	1,61	100
-4,75+3,36	9,04	10,65	98,39
-3,36+2,38	10,64	21,29	89,36
-2,38+1,68	8,43	29,72	78,71
-1,68+1,19	8,23	37,96	70,28
-1,19+0,840	3,21	41,17	62,05
-0,840+0,600	8,84	50,00	58,84
-0,600+0,420	6,43	56,43	50,00
-0,420+0,297	6,83	63,26	43,57
-0,297+0,210	6,83	70,08	36,75
-0,210+0,150	7,83	77,92	29,92
-0,150	22,09	100,00	22,09
Toplam	100,00		



Şekil A.10: -5,6 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.11: -3,36 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi

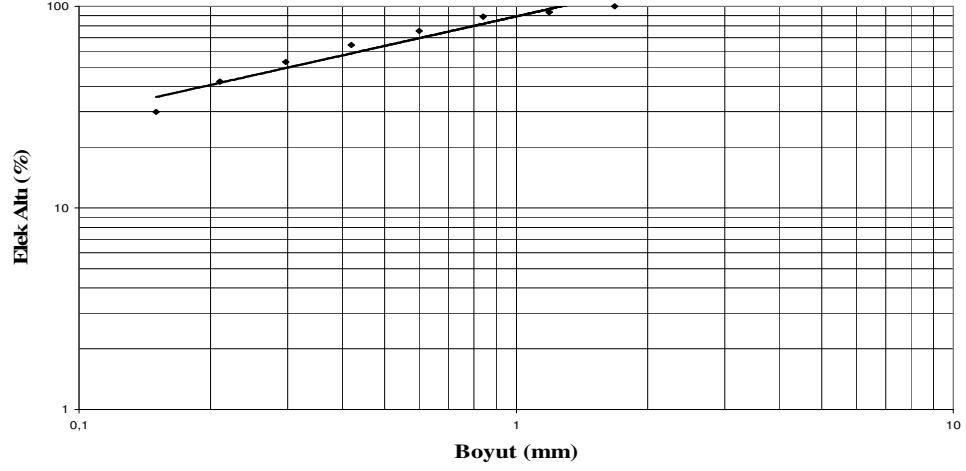
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	$\sum E.Ü. (%)$	$\sum E.A (%)$
-3,36+2,38	4,82	4,82	100
-2,38+1,68	10,44	15,26	95,18
-1,68+1,19	11,45	26,71	84,74
-1,19+0,840	6,02	32,73	73,29
-0,840+0,600	12,05	44,78	67,27
-0,600+0,420	8,63	53,41	55,22
-0,420+0,297	8,03	61,45	46,59
-0,297+0,210	7,03	68,47	38,55
-0,210+0,150	8,63	77,11	31,53
-0,150	22,89	100,00	22,89
Toplam	100,00		



Şekil A.11: -3,36 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.12: -1,68 mm Boyutundaki Ürün Elek Analizi

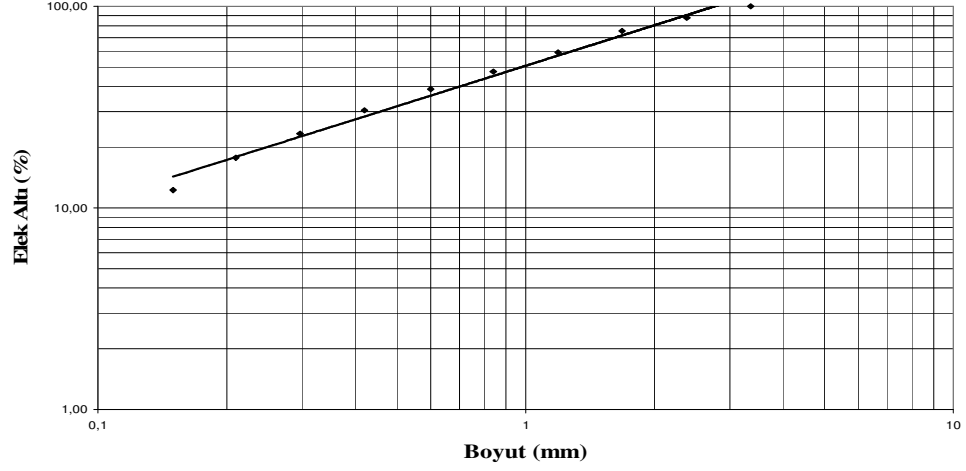
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-1,68+1,19	6,44	6,44	100
-1,19+0,840	4,63	11,07	93,56
-0,840+0,600	13,48	24,55	88,93
-0,600+0,420	11,27	35,82	75,45
-0,420+0,297	11,27	47,08	64,19
-0,297+0,210	10,66	57,75	52,92
-0,210+0,150	12,27	70,02	42,25
-0,150	29,98	100,00	29,98
Toplam	100,00		



Şekil A.12: -1,68 mm Boyutundaki Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.13: Bilya Yükleme Deneyine Beslenen Malzemenin Elek Analizi

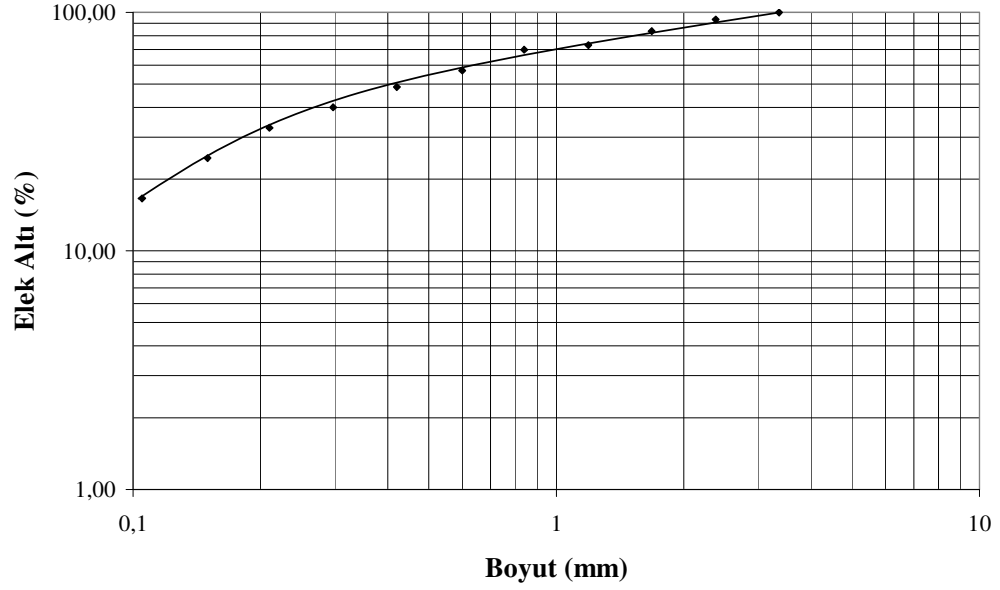
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	12,16	12,16	100,00
-2,38+1,68	12,42	24,58	87,84
-1,68+1,19	16,43	41,01	75,43
-1,19+0,840	11,54	52,55	58,99
-0,840+0,600	8,55	61,10	47,45
-0,600+0,420	8,40	69,50	38,90
-0,420+0,297	7,11	76,61	30,50
-0,297+0,210	5,67	82,28	23,39
-0,210+0,150	5,46	87,74	17,72
-0,150	12,26	100,00	12,26
Toplam	100,00		



Şekil A.13: Bilya Yükleme Deneyine Beslenen Malzemenin Elek Altı Eğrisi

Tablo A.14: %26 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi

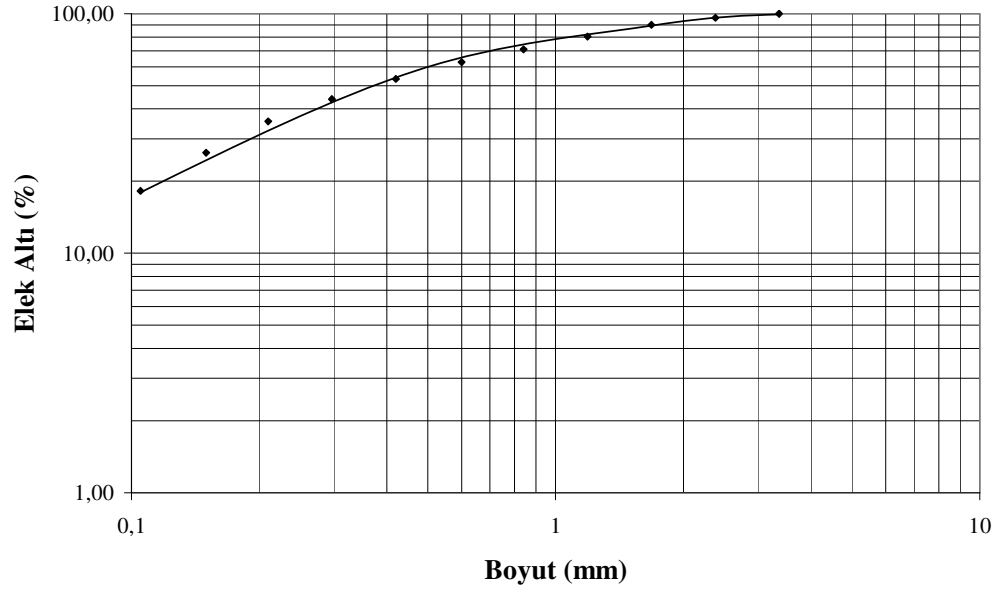
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	6,48	6,48	100,00
-2,38+1,68	10,12	16,60	93,52
-1,68+1,19	10,32	26,93	83,40
-1,19+0,840	3,24	30,16	73,08
-0,840+0,600	12,75	42,92	69,84
-0,600+0,420	8,50	51,42	57,09
-0,420+0,297	8,50	59,92	48,58
-0,297+0,210	7,29	67,21	40,08
-0,210+0,150	8,30	75,51	32,79
-0,150+0,105	7,89	83,40	24,49
-0,105	16,60	100,00	16,60
Toplam	100,00		



Şekil A.14: %26 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.15: %30 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi

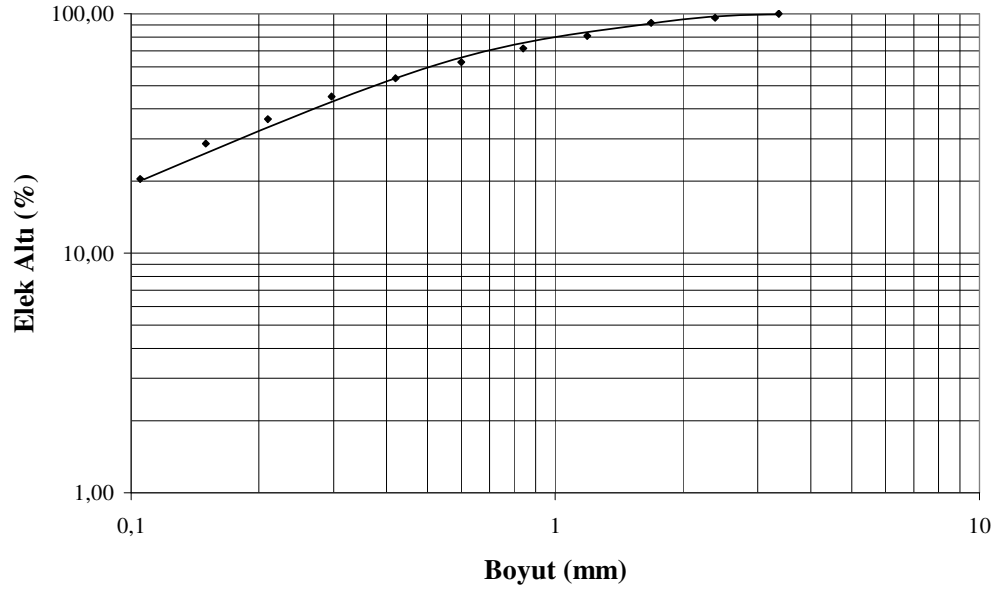
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	3,82	3,82	100,00
-2,38+1,68	6,29	10,11	96,18
-1,68+1,19	9,66	19,78	89,89
-1,19+0,840	9,21	28,99	80,22
-0,840+0,600	8,31	37,30	71,01
-0,600+0,420	9,21	46,52	62,70
-0,420+0,297	9,44	55,95	53,48
-0,297+0,210	8,54	64,49	44,04
-0,210+0,150	9,21	73,71	35,51
-0,150+0,105	8,09	81,80	26,29
-0,105	18,20	100,00	18,20
Toplam	100,00		



Şekil A.15: %30 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.16: %34 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi

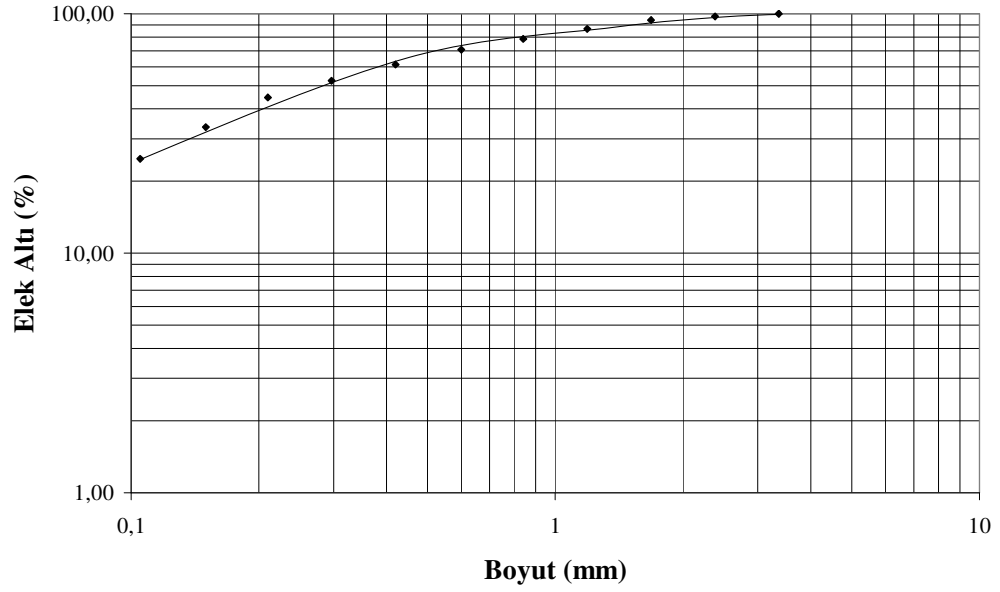
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	3,81	3,81	100,00
-2,38+1,68	4,48	8,29	96,19
-1,68+1,19	10,99	19,28	91,70
-1,19+0,840	8,97	28,25	80,72
-0,840+0,600	8,97	37,22	71,75
-0,600+0,420	8,97	46,19	62,78
-0,420+0,297	8,74	54,93	53,81
-0,297+0,210	8,74	63,68	45,07
-0,210+0,150	7,62	71,30	36,32
-0,150+0,105	8,30	79,59	28,70
-0,105	20,40	100,00	20,40
Toplam	100,00		



Şekil A.16: %34 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.17: %38 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi

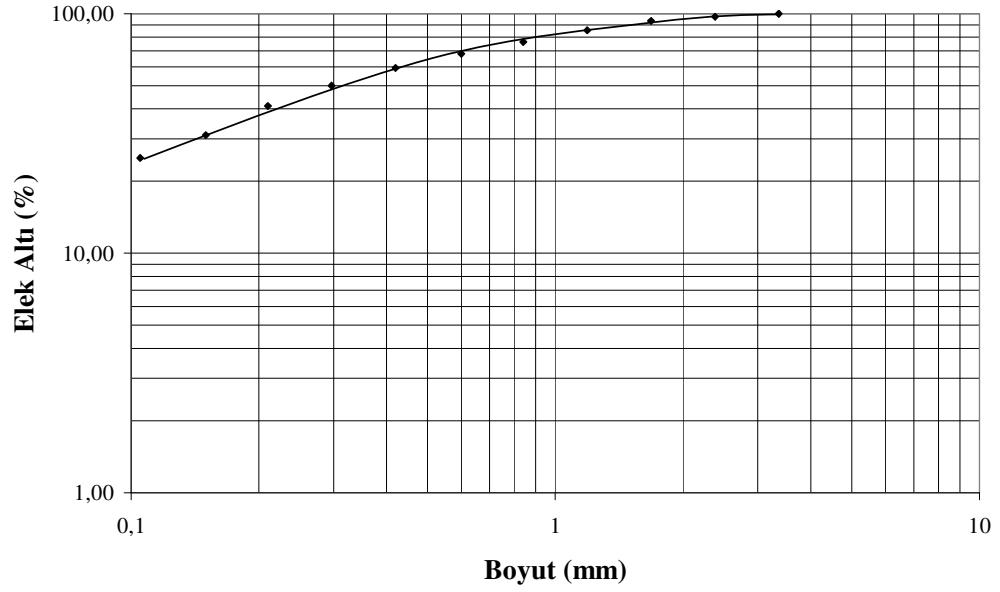
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	2,48	2,48	100,00
-2,38+1,68	3,61	6,09	97,52
-1,68+1,19	7,45	13,54	93,91
-1,19+0,840	7,90	21,44	86,46
-0,840+0,600	7,90	29,34	78,56
-0,600+0,420	9,26	38,60	70,65
-0,420+0,297	8,80	47,40	61,40
-0,297+0,210	7,90	55,30	52,60
-0,210+0,150	11,06	66,36	44,70
-0,150+0,105	8,80	75,17	33,63
-0,105	24,83	100,00	24,83
Toplam	100,00		



Şekil A.17: %38 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.18: %42 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Analizi

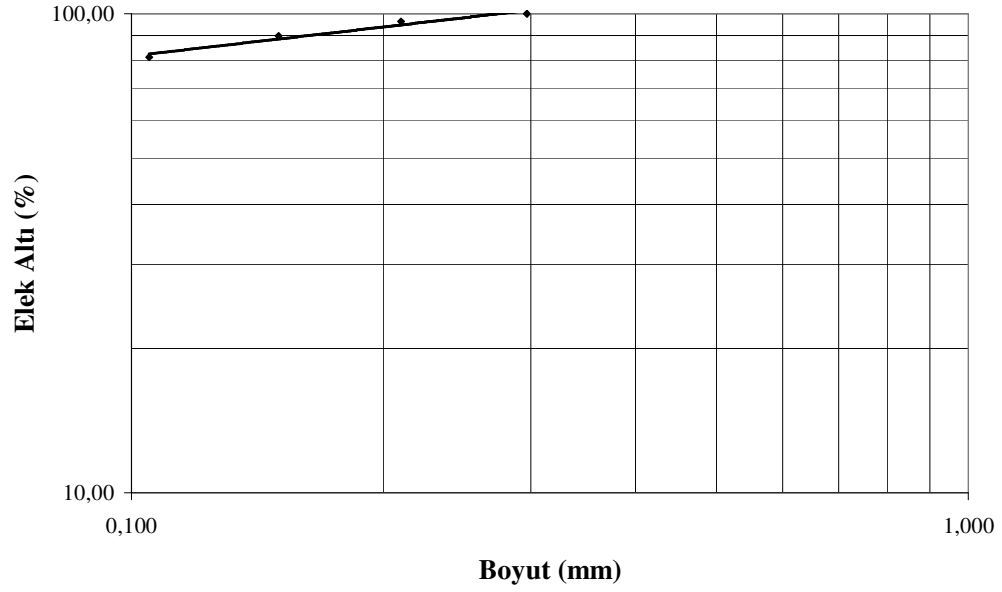
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	2,95	2,95	100,00
-2,38+1,68	3,63	6,58	97,05
-1,68+1,19	8,16	14,74	93,42
-1,19+0,840	9,07	23,81	85,26
-0,840+0,600	8,16	31,97	76,19
-0,600+0,420	8,62	40,59	68,03
-0,420+0,297	9,30	49,89	59,41
-0,297+0,210	8,84	58,73	50,11
-0,210+0,150	10,20	68,94	41,27
-0,150+0,105	6,12	75,06	31,07
-0,105	24,94	100,00	24,94
Toplam	100,00		



Şekil A.18: %42 Bilya Yüklemesine Göre Oluşan Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.19: %26 Bilya Yüklemesinde 69 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün Elek Analizi

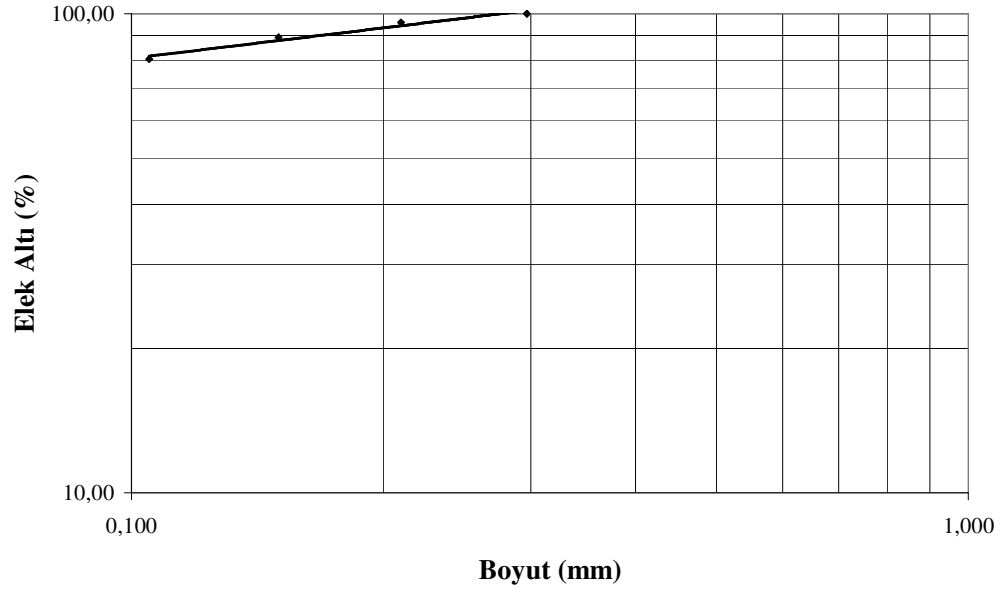
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-0,297+0,210	3,69	3,69	100,00
-0,210+0,150	6,50	10,19	96,31
-0,150+0,105	8,58	18,77	89,81
-0,105	81,23	100,00	81,23
Toplam	100,00		



Şekil A.19: %26 Bilya Yüklemesinde 69 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Altı Eğrisi

Tablo A.20: %30 Bilya Yüklemesinde 60 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan
Ürünün Elek Analizi

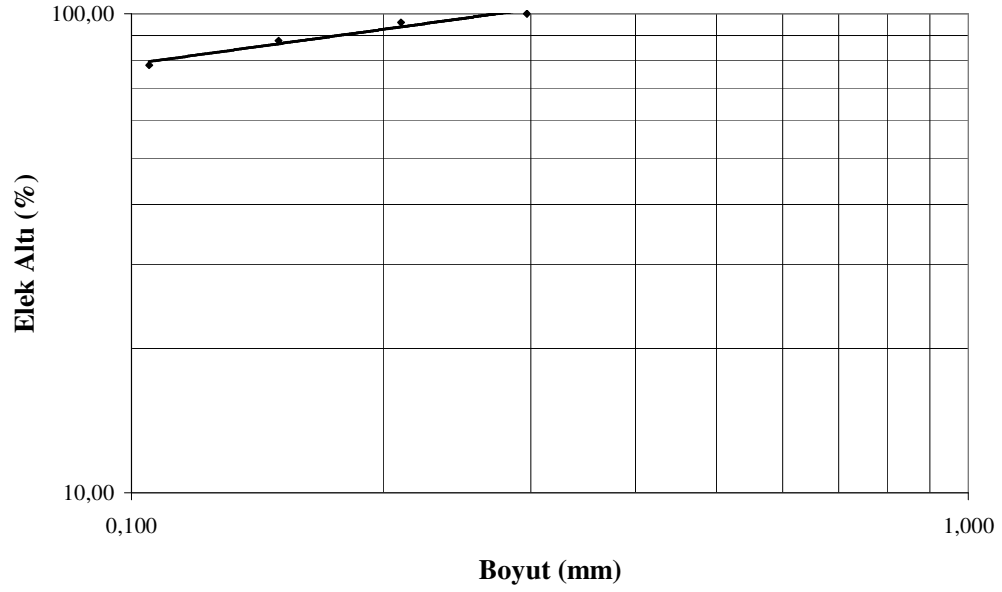
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-0,297+0,210	4,14	4,14	100,00
-0,210+0,150	6,63	10,77	95,86
-0,150+0,105	8,90	19,67	89,23
-0,105	80,33	100,00	80,33
Toplam	100,00		



Şekil A.20: %30 Bilya Yüklemesinde 60 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Altı Eğrisi

Tablo A.21: %34 Bilya Yüklemesinde 51 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Analizi

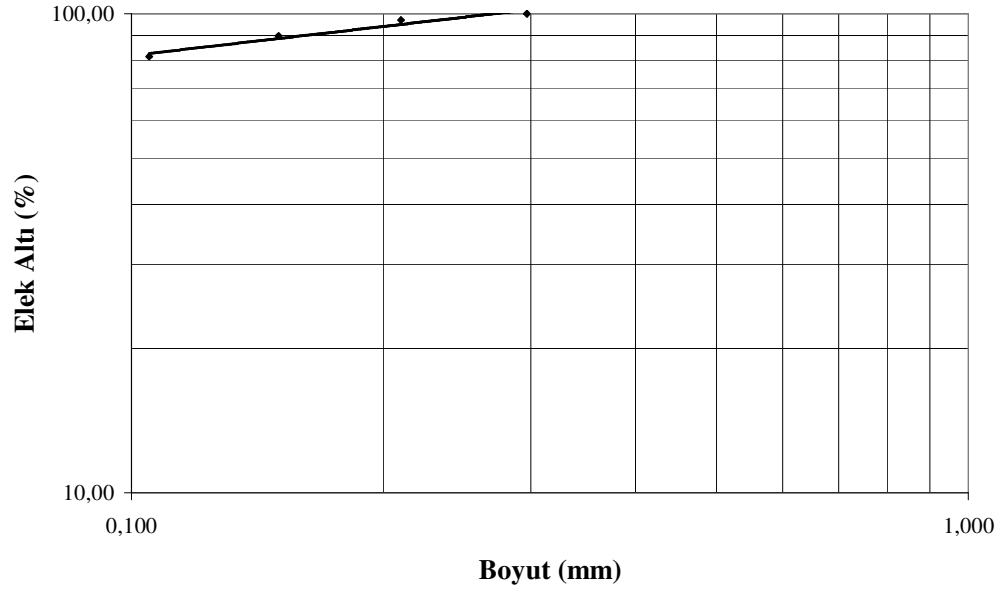
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-0,297+0,210	4,04	4,04	100,00
-0,210+0,150	8,06	12,10	95,96
-0,150+0,105	9,82	21,92	87,90
-0,105	78,08	100,00	78,08
Toplam	100,00		



Şekil A.21: %34 Bilya Yüklemesinde 51 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Altı Eğrisi

Tablo A.22: %38 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Analizi

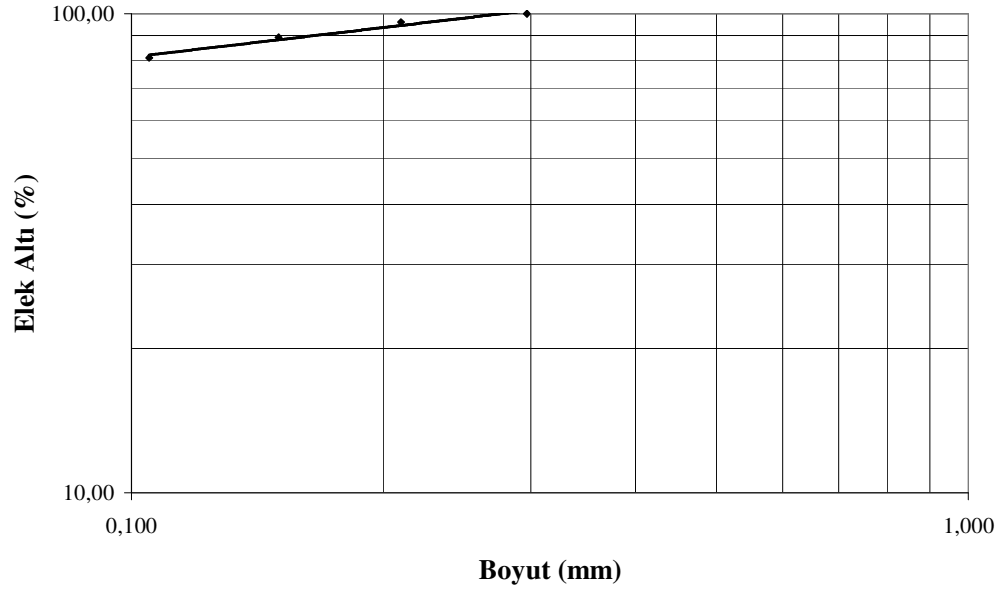
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-0,297+0,210	2,98	2,98	100,00
-0,210+0,150	7,12	10,10	97,02
-0,150+0,105	8,53	18,63	89,90
-0,105	81,37	100,00	81,37
Toplam	100,00		



Şekil A.22: %38 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Altı Eğrisi

Tablo A.23: %42 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Analizi

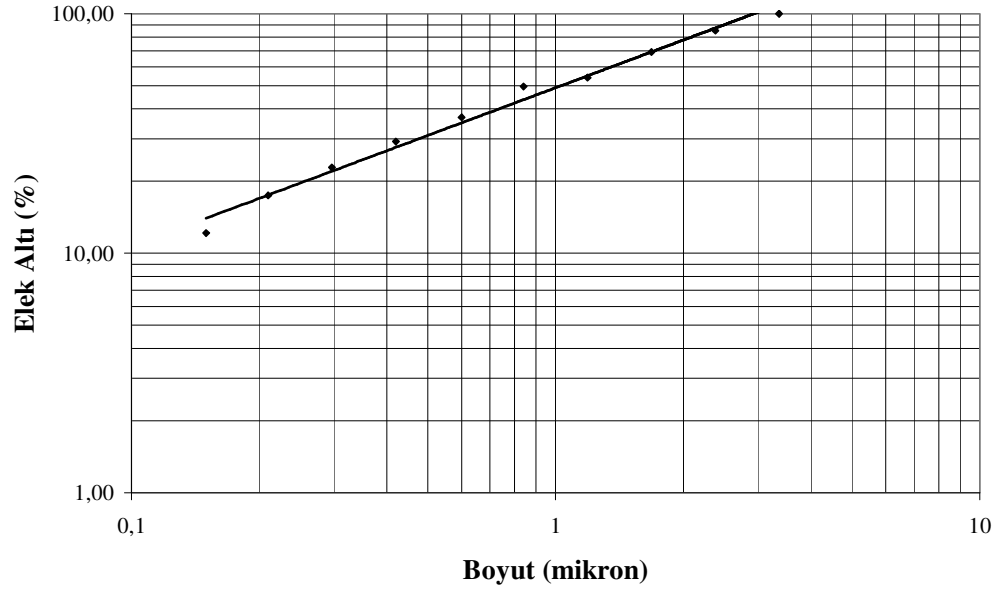
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-0,297+0,210	3,96	3,96	100,00
-0,210+0,150	6,78	10,74	96,04
-0,150+0,105	8,29	19,03	89,26
-0,105	80,97	100,00	80,97
Toplam	100,00		



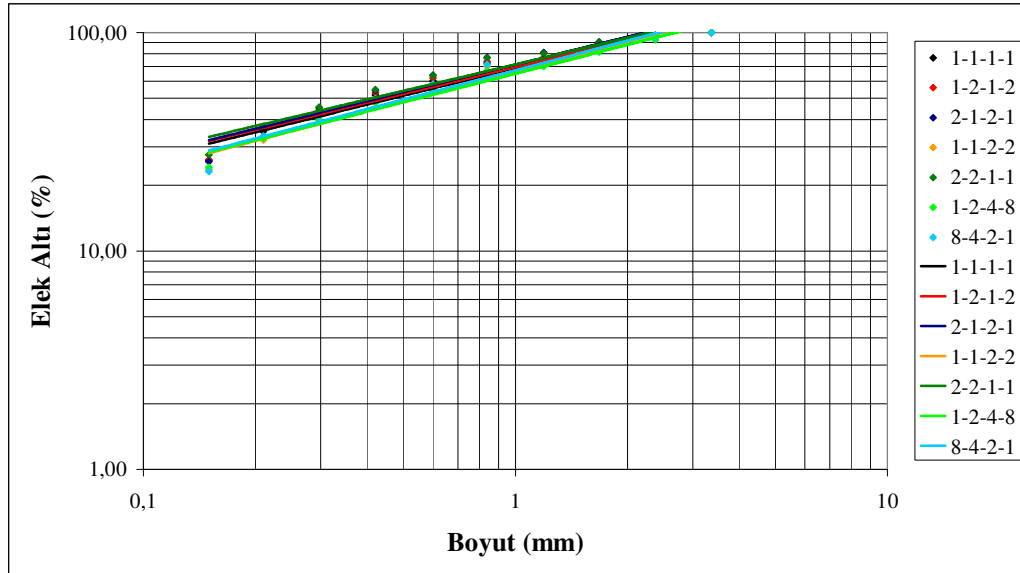
Şekil A.23: %42 Bilya Yüklemesinde 45 Dakikalık Öğütme Sonucu Oluşan Ürünün
Elek Altı Eğrisi

Tablo.A.24: Bilya Kompozisyonu Öğütme Deneylerine Beslenen Numunenin Elek
Analizi

Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	14,79	14,79	100,00
-2,38+1,68	15,98	30,77	85,21
-1,68+1,19	15,09	45,86	69,23
-1,19+0,840	4,44	50,29	54,14
-0,840+0,600	12,72	63,01	49,70
-0,600+0,420	7,69	70,71	36,98
-0,420+0,297	6,51	77,22	29,29
-0,297+0,210	5,33	82,54	22,78
-0,210+0,150	5,33	87,87	17,46
-0,150	12,13	100,00	12,13
Toplam	100,00		



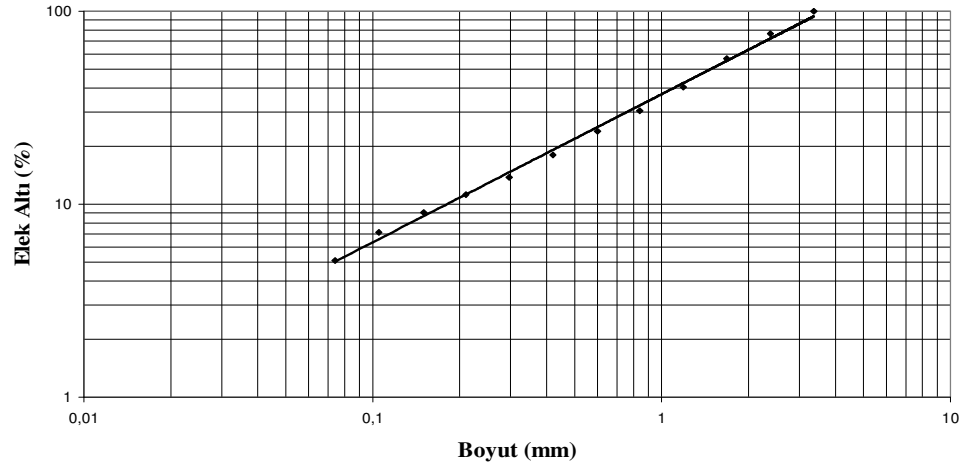
Şekil A.24: Bilya Kompozisyonu Deneylerine Beslenen Numunenin Elek Altı Eğrisi



Şekil A.25: Farklı Bilya Kompozisyonlarında Yapılan Öğütmeler Sonucu Oluşan Elek Altı Eğrileri

Tablo A.25: Bond Deneyine Beslenen Kireçtaşı Elek Analizi

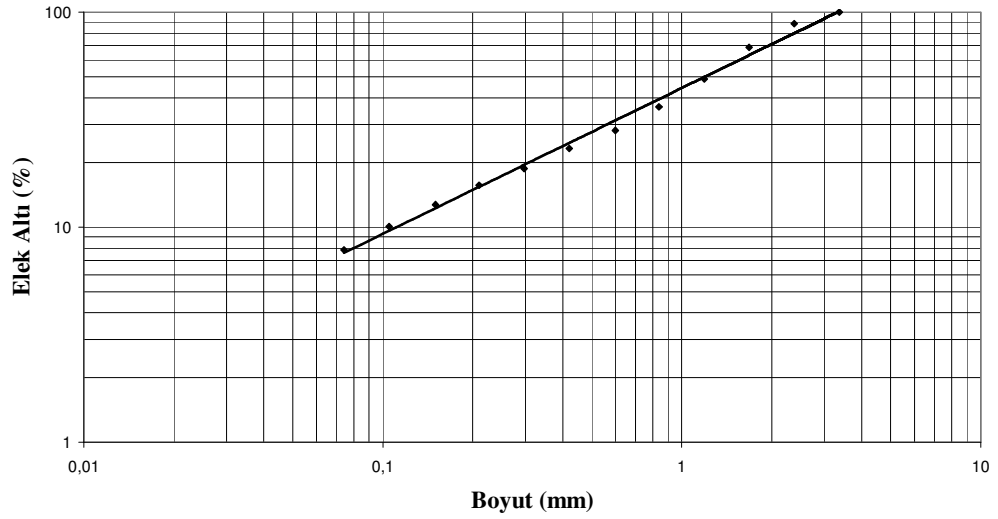
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	23,33	23,33	100
-2,38+1,68	19,88	43,21	76,67
-1,68+1,19	16,31	59,52	56,79
-1,19+0,840	10,00	69,52	40,48
-0,840+0,420	12,50	82,02	30,48
-0,420+0,297	4,17	86,19	17,98
-0,297+0,210	2,62	88,81	13,81
-0,210+0,150	2,14	90,95	11,19
-0,150+0,105	1,90	92,85	9,05
-0,105+0,074	2,02	94,88	7,14
-0,074	5,12	100,00	5,12
Toplam	100,00		



Şekil A.26: Bond Deneyine Beslenen Kireçtaşı Elek Altı Eğrisi

Tablo A.26: Bond Deneyine Beslenen Klinker Elek Analizi

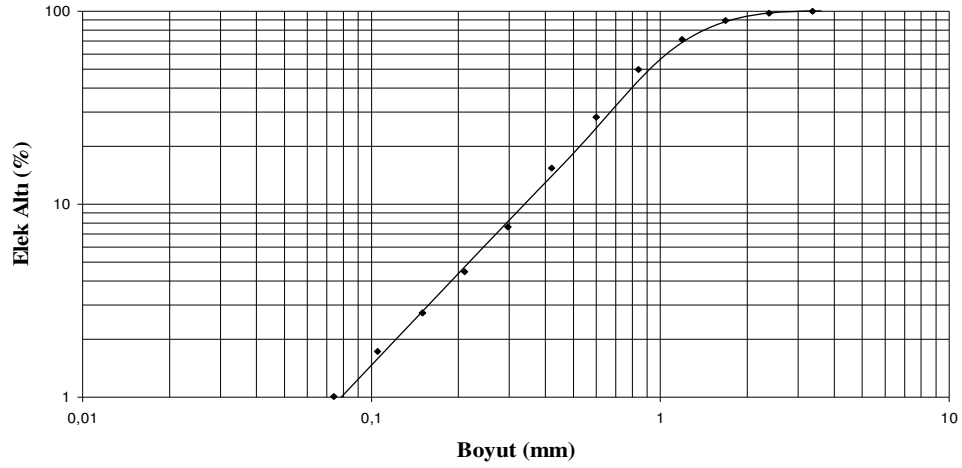
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	11,34	11,34	100
-2,38+1,68	20,17	31,51	88,66
-1,68+1,19	19,61	51,12	68,49
-1,19+0,840	12,61	63,73	48,88
-0,840+0,420	13,03	76,76	36,27
-0,420+0,297	4,48	81,24	23,24
-0,297+0,210	3,08	84,32	18,76
-0,210+0,150	2,94	87,26	15,68
-0,150+0,105	2,66	89,92	12,74
-0,105+0,074	2,24	92,16	10,08
-0,074	7,84	100	7,84
Toplam	100		



Şekil A.27: Bond Deneyine Beslenen Klinker Elek Altı Eğrisi

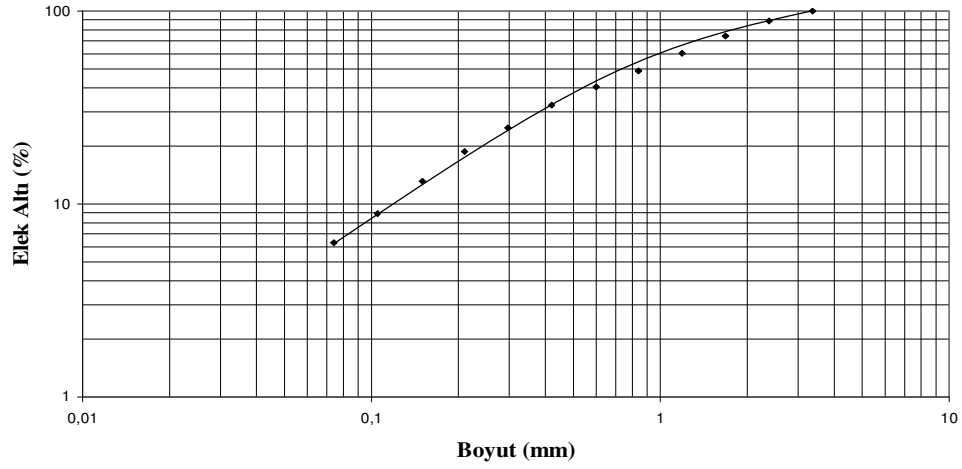
Tablo A.27: Bond Deneyi Beslenen Curuf Elek Analizi

Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	2,45	2,45	100
-2,38+1,68	8,07	10,52	97,55
-1,68+1,19	17,87	28,39	89,48
-1,19+0,840	21,76	50,14	71,61
-0,840+0,420	34,44	84,58	49,86
-0,420+0,297	7,78	92,36	15,42
-0,297+0,210	3,17	95,53	7,64
-0,210+0,150	1,73	97,26	4,47
-0,150+0,105	1,01	98,27	2,74
-0,105+0,074	0,72	98,99	1,73
-0,074	1,01	100,00	1,01
Toplam	100,00		

**Şekil A.28:** Bond Deneyine Beslenen Curuf Elek Altı Eğrisi

Tablo A.28: Bond Deneyine Beslenen Tras Elek Analizi

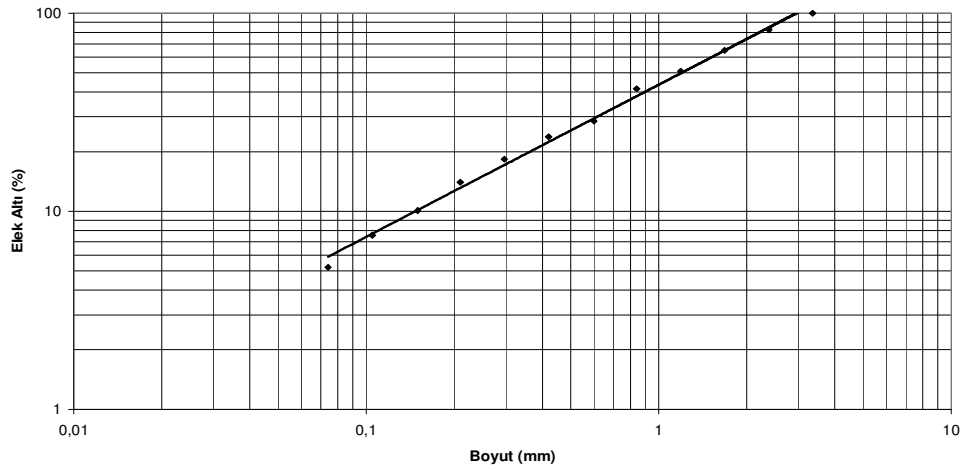
Boyut Aralığı (mm)	Miktar	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	11,01	11,01	100
-2,38+1,68	14,69	25,70	88,99
-1,68+1,19	13,99	39,68	74,30
-1,19+0,840	11,36	51,04	60,31
-0,840+0,420	16,43	67,48	48,95
-0,420+0,297	7,69	75,17	32,52
-0,297+0,210	6,12	81,29	24,83
-0,210+0,150	5,59	86,88	18,71
-0,150+0,105	4,20	91,08	13,11
-0,105+0,074	2,62	93,70	8,92
-0,074	6,29	100,00	6,29
Toplam	100,00		



Şekil A.29: Bond Deneyine Beslenen Tras Elek Altı Eğrisi

Tablo A.29: Bond Deneyine Beslenen Alçıtaşı Elek Analizi

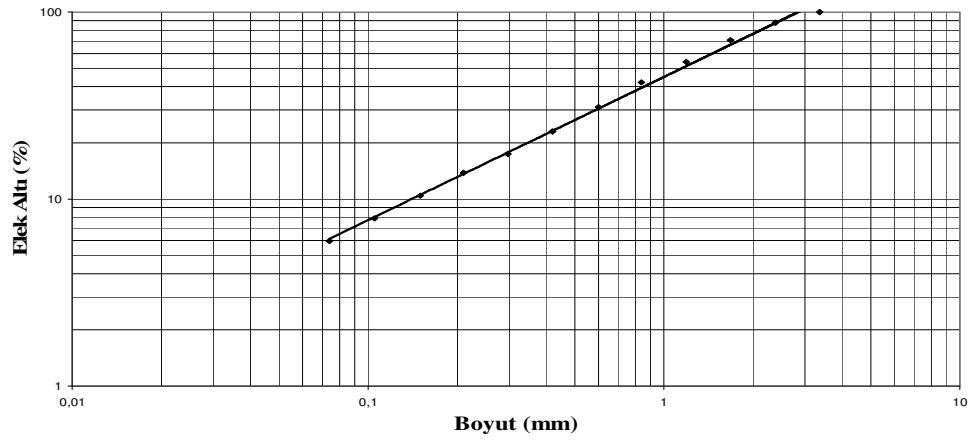
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	17,51	17,51	100
-2,38+1,68	17,51	35,02	82,49
-1,68+1,19	14,04	49,06	64,98
-1,19+0,840	4,26	53,31	50,95
-0,840+0,420	20,82	74,13	46,69
-0,420+0,297	5,99	80,13	25,87
-0,297+0,210	4,57	84,70	19,87
-0,210+0,150	4,26	88,96	15,30
-0,150+0,105	2,84	91,80	11,04
-0,105+0,074	2,68	94,48	8,20
-0,074	5,52	100,00	5,52
Toplam	100,00		



Şekil A.30: Bond Deneyine Beslenen Alçıtaşı Elek Altı Eğrisi

Tablo A.30: Bond Deneyine Beslenen Karışım Elek Analizi

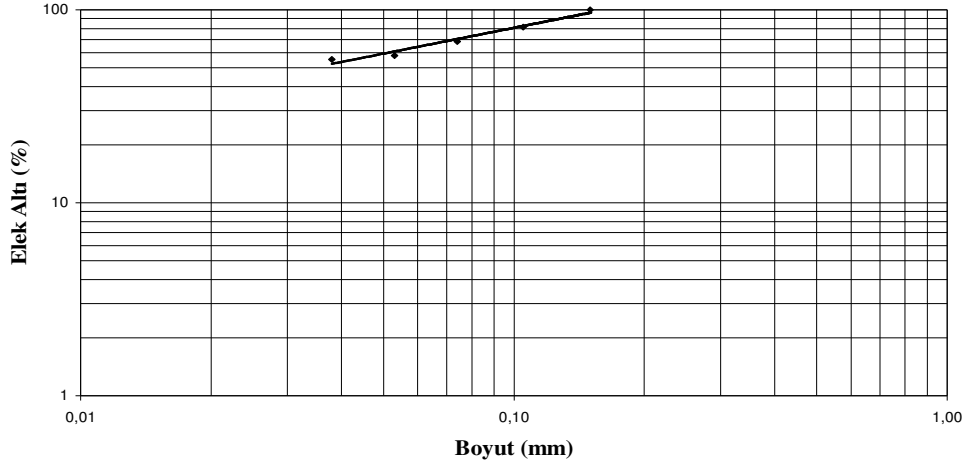
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-3,36+2,38	12,34	12,34	100
-2,38+1,68	16,81	29,15	87,66
-1,68+1,19	16,81	45,96	70,85
-1,19+0,840	6,6	52,56	54,04
-0,840+0,420	24,47	77,03	47,44
-0,420+0,297	5,53	82,56	22,97
-0,297+0,210	3,62	86,18	17,44
-0,210+0,150	3,4	89,58	13,82
-0,150+0,105	2,55	92,13	10,42
-0,105+0,074	1,91	94,04	7,87
-0,074	5,96	100	5,96
Toplam	100		



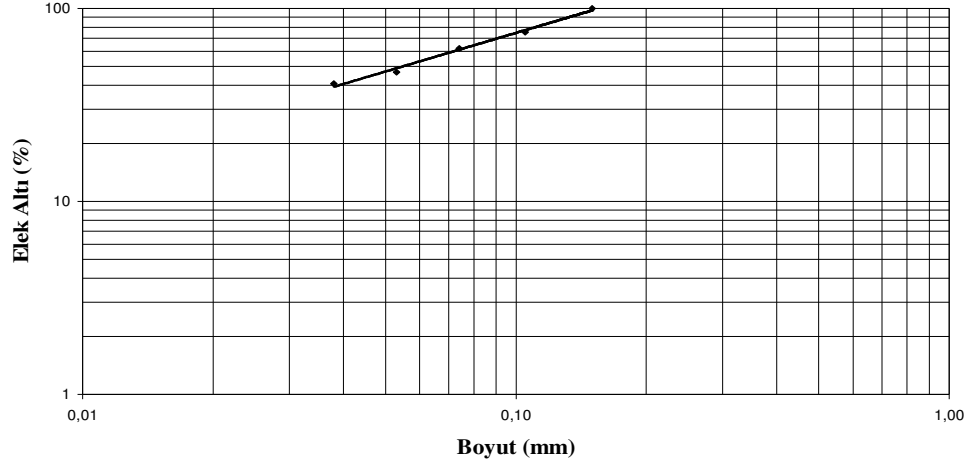
Şekil A.31: Bond Deneyine Beslenen Karışım Elek Altı Eğrisi

Tablo A.31: Bond Deneyi Ürün Kireçtaşı Elek Analizi

Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	18,67	18,67	100,00
-105+74	12,67	31,34	81,33
-74+53	10,67	42,00	68,67
-53+38	2,67	44,67	58,00
-38	55,33	100,00	55,33
Toplam	100,00		

**Şekil A.32:** Bond Deneyi Ürün Kireçtaşı Elek Altı Eğrisi**Tablo A.32:** Bond Deneyi Ürün Klinker Elek Analizi

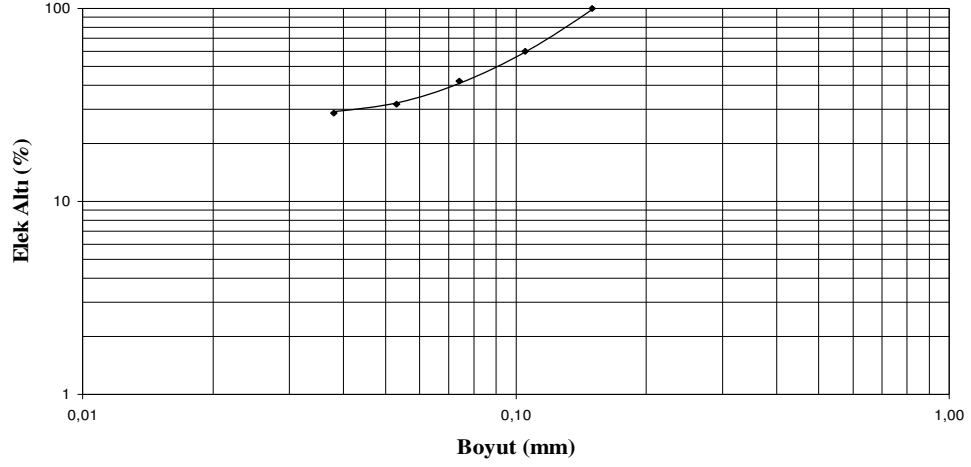
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	24,67	24,67	100,00
-105+74	13,33	38,00	75,33
-74+53	15,33	53,34	62,00
-53+38	6,00	59,34	46,67
-38	40,67	100,00	40,67
Toplam	100,00		



Şekil A.33: Bond Deneyi Ürün Klinker Elek Altı Eğrisi

Tablo A.33: Bond Deneyi Ürün Curuf Elek Analizi

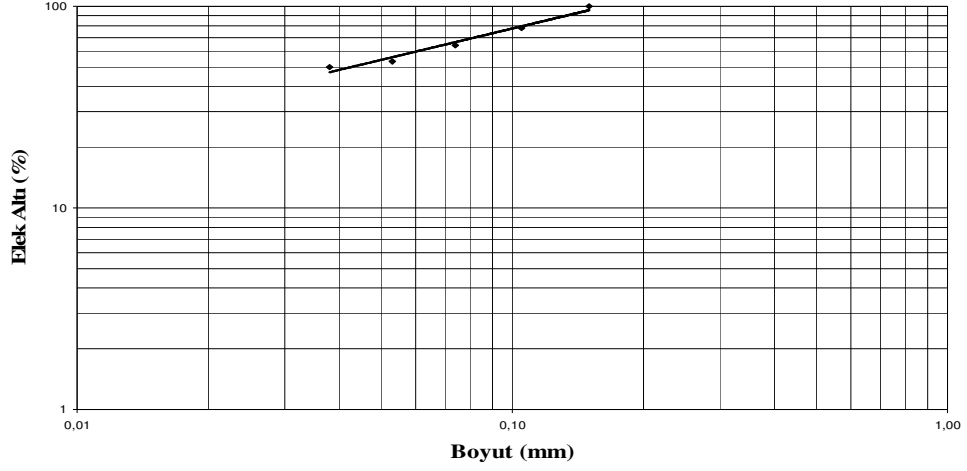
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	40,00	40	100,00
-105+74	18,00	58,00	60,00
-74+53	10,00	68,00	42,00
-53+38	3,33	71,33	32,00
-38	28,67	100,00	28,67
Toplam	100,00		



Şekil A.34: Bond Deneyi Ürün Curuf Elek Altı Eğrisi

Tablo A.34: Bond Deneyi Ürün Tras Elek Analizi

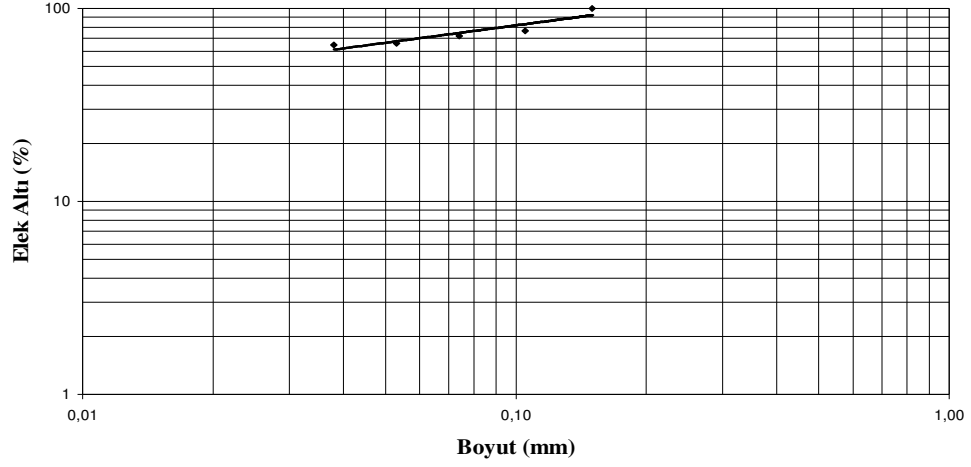
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	$\sum E.\ddot{U}.$ (%)	$\sum E.A$ (%)
-150+105	22,00	22	100,00
-105+74	14,00	36,00	78,00
-74+53	10,67	46,67	64,00
-53+38	3,33	50,00	53,33
-38	50,00	100,00	50,00
Toplam	100,00		



Şekil A.35: Bond Deneyi Ürün Tras Elek Altı Eğrisi

Tablo A.35: Bond Deneyi Ürün Alçıtaşı Elek Analizi

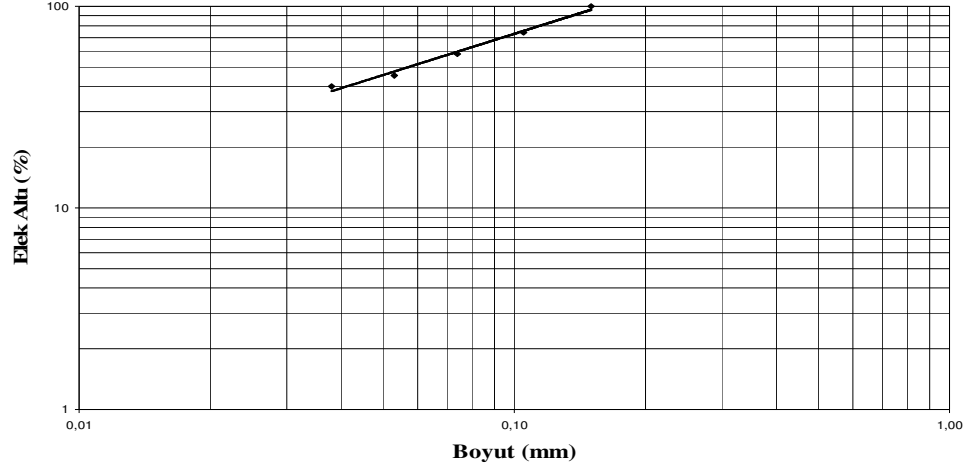
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	23,33	23,33	100,00
-105+74	4,67	28,00	76,67
-74+53	6,00	34,00	72,00
-53+38	1,33	35,33	66,00
-38	64,67	100,00	64,67
Toplam	100,00		



Şekil A.36: Bond Deneyi Ürün Alçıtaşı Elek Altı Eğrisi

Tablo A.36: Bond Deneyi Ürün Karışım Elek Analizi

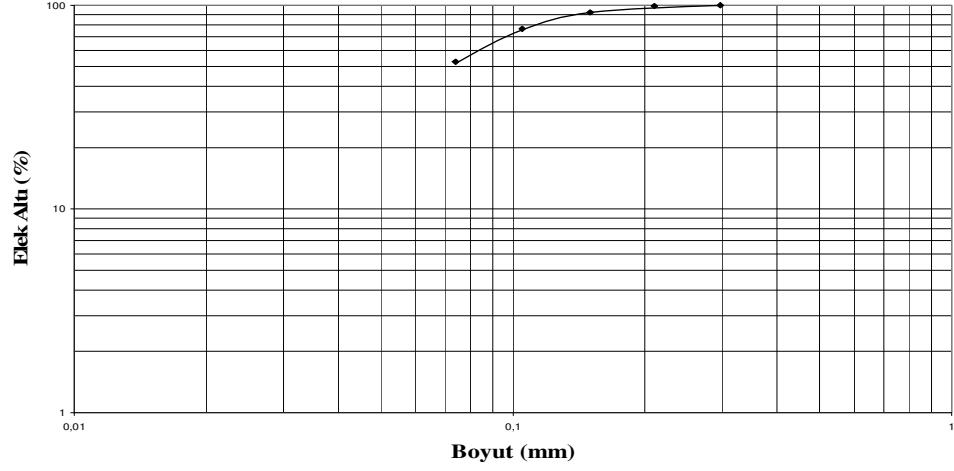
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-150+105	26,00	26	100,00
-105+74	16,00	42,00	74,00
-74+53	12,67	54,67	58,00
-53+38	5,33	60,00	45,33
-38	40,00	100,00	40,00
Toplam	100,00		



Şekil A.37: Bond Deneyi Ürün Karışım Altı Eğrisi

Tablo A.37: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Klinker Ürün Elek Analizi

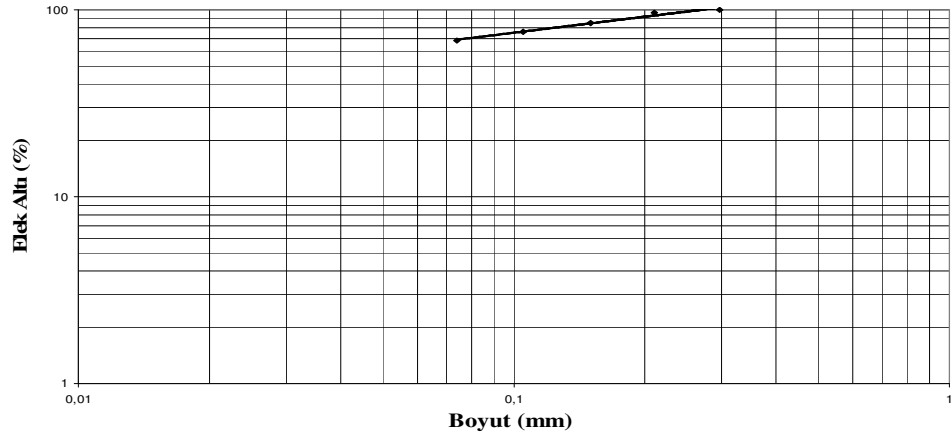
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	1,01	1,01	100
-210+150	6,65	7,66	98,99
-150+105	15,73	23,39	92,34
-105+74	23,79	47,18	76,61
-74	52,82	100,00	52,82
Toplam	100,00		



Şekil A.38: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Klinker Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.38: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Kireçtaşı Ürün Elek Analizi

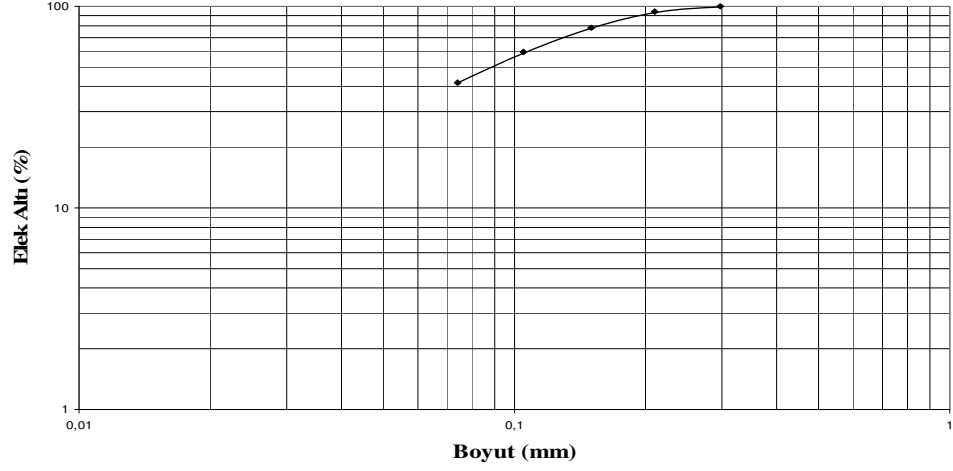
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	$\sum E.Ü. (%)$	$\sum E.A (%)$
-297+210	3,41	5,81	100
-210+150	11,62	17,43	96,59
-150+105	8,62	26,05	84,97
-105+74	7,82	33,87	76,35
-74	68,74	102,60	68,54
Toplam	100,20		



Şekil A.39: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Kireçtaşı Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.39: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Curuf Ürün Elek Analizi

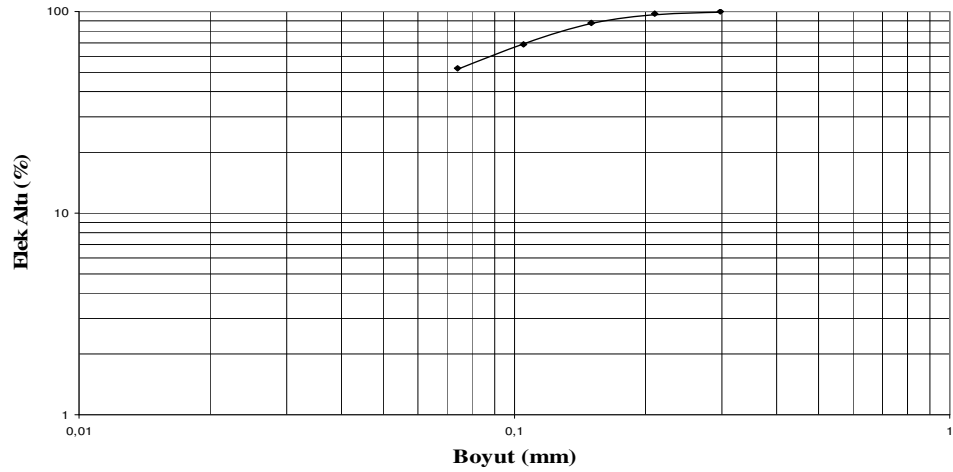
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	T.E.Ü (%)	T.E.A (%)
-297+210	6,02	6,02	100
-210+150	15,73	21,75	93,98
-150+105	18,83	40,58	78,25
-105+74	17,67	58,25	59,42
-74	41,75	100,00	41,75
Toplam	100,00		



Şekil A.40: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.40: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Tras Ürün Elek Analizi

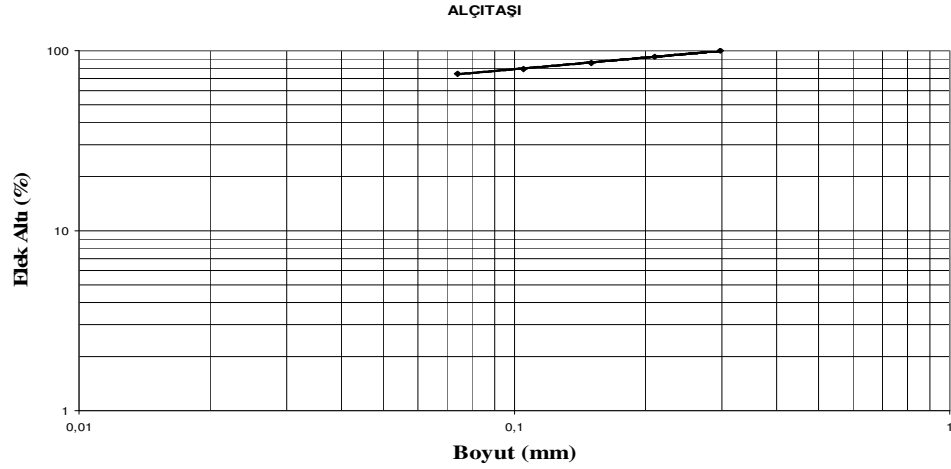
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	2,44	2,44	100
-210+150	9,76	12,20	97,56
-150+105	19,11	31,30	87,80
-105+74	16,46	47,77	68,70
-74	52,24	100,00	52,24
Toplam	100,00		



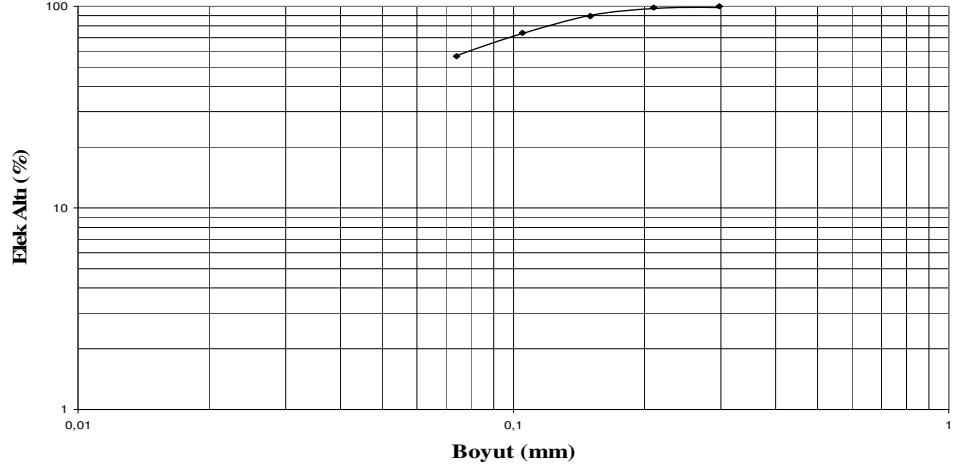
Şekil A.41: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Tras Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.41: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Alçıtaşı Ürün Elek Analizi

Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	7,40	7,40	100
-210+150	7,00	14,40	92,60
-150+105	6,60	21,00	85,60
-105+74	4,60	25,60	79,00
-74	74,40	100,00	74,40
Toplam	99,40		

**Şekil A.42:** Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Alçıtaşı Ürün Elek Altı Eğrisi**Tablo A.42:** Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Karışım Ürün Elek Analizi

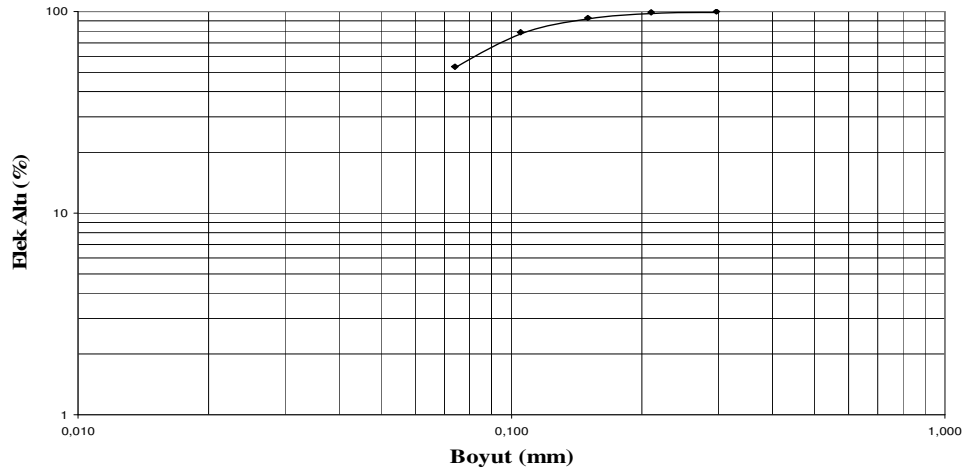
Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	1,59	1,59	100
-210+150	8,95	10,54	98,41
-150+105	15,51	26,04	89,46
-105+74	17,30	43,34	73,96
-74	56,66	100,00	56,66
Toplam	100,00		



Şekil A.43: Lab.Tipi Bilyalı Değirmen Deneyi Karışım Ürün Elek Altı Eğrisi

Tablo A.43: %90 Klinker+%10 Curuf Ürün Elek Analizi

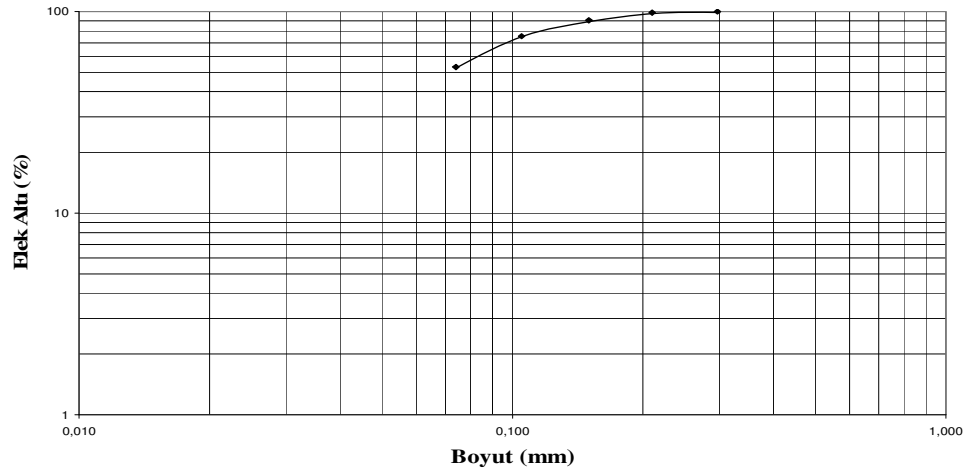
Boyut Aralığı (mm)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	0,80	0,80	100
-210+150	6,24	7,04	99,20
-150+105	13,88	20,92	92,96
-105+74	25,75	46,68	79,07
-74	53,32	100,00	53,32
Toplam	100,00		



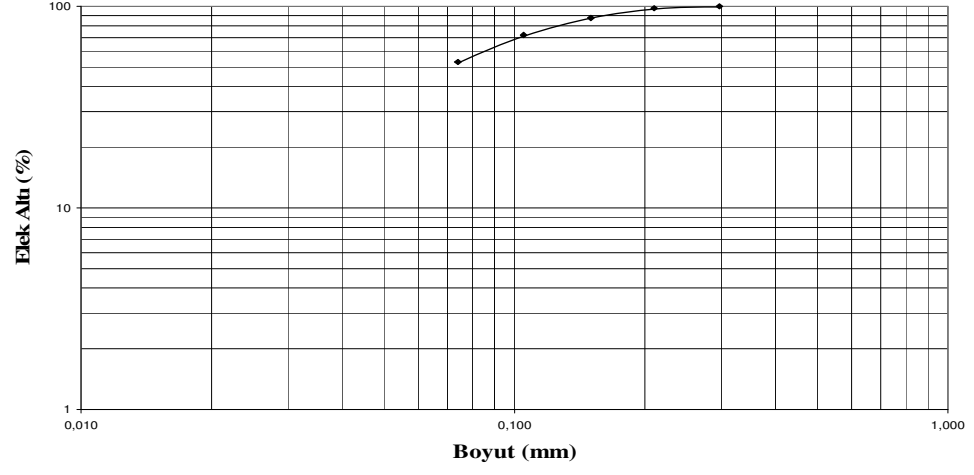
Şekil A.44: %90 Klinker+%10 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi.

Tablo A.44: %70 Klinker+%30 Curuf Ürün Elek Analizi

Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	1,20	1,20	100
-210+150	8,42	9,62	98,80
-150+105	15,03	24,65	90,38
-105+74	22,24	46,89	75,35
-74	53,11	100,00	53,11
Toplam	100,00		

**Şekil A.45: %70 Klinker+%30 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi****Tablo A.45: %50 Klinker+%50 Curuf Ürün Elek Analizi**

Boyut Aralığı (mikron)	Miktar (%)	Σ E.Ü. (%)	Σ E.A (%)
-297+210	2,00	2,00	100
-210+150	10,42	12,42	98,00
-150+105	15,43	27,85	87,58
-105+74	19,24	47,09	72,14
-74	52,91	100,00	52,91
Toplam	100,00		



Şekil A.46: %50 Klinker+%50 Curuf Ürün Elek Altı Eğrisi

ÖZGEÇMİŞ

Fırat KARAKAŞ 03.06.1980 yılında Bursa’da doğdu. İlköğretimini 3.sınıf dahil Konya’da, Orta-2 dahil Erzurum’da tamamlayan Fırat KARAKAŞ, orta-3 dahil lise eğitimini ise Bursa’de tamamlamıştır. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Mühendiliği bölümünde Üniversite Eğitimine başlamış ve İngilizce Hazırlık sınıfından sonra, 1999-2000 eğitim-öğretim döneminde lisans eğitimine başlamıştır.

İlk stajını 2002 yaz döneminde Park Teknik A.Ş. Çayırhan yeraltı kömür işletmesinde yapmıştır. 2003 yaz döneminde ise Kalemaden A.Ş.’nin Çanakkale-Çan, Aydın-Çine ve İstanbul-Şile bölgelerindeki tesislerinde ve İTÜ Cevher-Kömür Hazırlama ve Değerlendirme Ana Bilim Dalında stajlarını tamamlamıştır. 2004 yılında aynı Ana Bilim Dalında kısa bir süre yarı zamanlı öğrenci asistan olarak görev yapan Fırat KARAKAŞ, 2004 yaz döneminde lisans eğitimini tamamlamış ve akabinde İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Cevher-Kömür Hazırlama ve Değerlendirme Ana Bilim Dalı Programında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

2005 Aralık ayında aynı Ana Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlayan Fırat KARAKAŞ, halen bu görevini devam ettirmektedir.