

**FARKLI SOĞUTMA HIZLARINDA SOĞUTULAN
ÇELİKHANE CÜRUFLLARININ ÖĞÜTME
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE GRINDING PARAMETERS OF
THE STEEL SLAGS COOLED AT DIFFERENT COOLING
RATES**

HAKAN DÜNDAR

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MADEN Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2006

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof.Dr. M. Ümit ATALAY

Üye (Danışman) :.....
Doç.Dr. A. Hakan BENZER

Üye :.....
Prof.Dr. Ş. Levent ERGÜN

ONAY

Bu tez/...../2006 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../2006

Prof.Dr. Ahmet R. ÖZDURAL
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

FARKLI SOĞUTMA HIZLARINDA SOĞUTULAN ÇELİKHANE CÜRUFLARININ ÖĞÜTME PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Hakan Dünder

ÖZ

Bu çalışmada, demir çelik fabrikalarında çelik üretimi sırasında açığa çıkan çelikhane cüruflarının çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'den temin edilen, farklı hızlarda soğutularak parça halde (~250 mm) elde edilen çelikhane cürufları ile granüle yüksek fırın cürufu numuneleri kullanılmıştır. İlk olarak çelikhane cürufunun farklı incelik ve katkı oranında çimentoya katılmasıyla elde edilen karışımlar üzerinde çimento dayanım testleri yapılarak elde edilen ürünün mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca hali hazırda çimento endüstrisinde kullanılmakta olan granüle yüksek fırın cürufu da karşılaştırma yapılmak amacıyla aynı şekilde dayanım çalışmalarında kullanılmıştır. Daha sonra numunelerin kimyasal ve mineralojik yapıları belirlenmiştir. Son olarak numunelerin ayrı ayrı ve de farklı katkı oranlarında klinker ile karıştırılarak standart Bond bilyalı değirmen iş indeksleri belirlenmiştir. Bu çalışmayı takiben, numunelere ait kırılma dağılım fonksiyonları da belirlenerek, numunelerin öğütme parametreleri karakterize edilmiştir.

Elde edilen bulgular ışığında, çelikhane cürufu katkılı çimentoların mekanik özellikleri ile cüruf soğutma hızının mineraloji ve buna bağlı olarak öğütme parametrelerine etkisi değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda şu genel sonuçlar bulunmuştur; çimento dayanım testleri sonucunda, granüle yüksek fırın cürufu içeren çimentolarla elde edilen dayanım değerleri aynı oranda çelikhane cürufu içeren çimentolarda da elde edilmiştir. Çelikhane cürufunun inceliği arttıkça çelikhane cürufu çimentonun dayanımı da iyileşmektedir. Çelikhane cüruflarının öğütülebilirlikleri, katkılı çimento

retiminde klinker ile birlikte tlen granüle yüksek fırın cürufunun tlebilirliinden farklılık göstermemektedir. Klinker ve cüruf numunelerinin birlikte tlmeleri sırasında harcanan spesifik öğütme enerjisi, ayrı ayrı tlmeleri sırasında harcanan miktara kıyasla daha yüksek olmaktadır. Cüruf soğutma hızının öğütme parametreleri ve de mineralojik yapı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tez kapsamında halihazırda iri boyutta elde edilen elikhane cüruflarının tlebilmesine yönelik alternatif bir devre tasarımı da yapılmıştır. Bu kapsamda konvansiyonel tekniklerin yanı sıra simülasyon tekniğinden de yararlanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: elikhane cürufu, imento, basınç dayanımı, tlebilirlik

Danışman: Doç.Dr. A. Hakan BENZER
Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı

INVESTIGATION OF THE GRINDING PARAMETERS OF THE STEEL SLAGS COOLED AT DIFFERENT COOLING RATES

Hakan Dündar

ABSTRACT

This study aims at, investigating the availability of the usage of steel slags in cement manufacturing process as an additive.

With in the context of this study, lump steel slag samples (~250 mm) cooled at different cooling rates and granulated blast furnace slag sample obtained from Ereğli Iron & Steel Works Co. were used. Firstly, cement strength tests were applied on cement mortars prepared by mixing cement and steel slag with different fineness at different ratios. In addition, granulated blast furnace slag used in cement industry as an additive was used in a same manner for comparison. Later, chemical and mineralogical compositions of the samples were determined. Finally, the Bond ball mill work indexes of the samples were determined separately and for their mixtures with clinker at different ratios. Following this study, by determining the breakage functions of the samples, the grinding parameters of the samples were characterised.

By using the data obtained from this study, the mechanical properties of the steel slag cements and the effect of cooling rate on mineralogy related with grinding parameters were evaluated.

This study leads to following conclusions; the granulated blast furnace slag cements' strength values were obtained from the steel slag cements, having the same mixture ratios, as well. Proportional to the steel slag fineness, the strength of steel slag cement is developing. The grindability of steel slags do not show any difference from the grindability of granulated blast furnace slag interground with clinker in cement industry. The specific energy consumption of grinding samples separately is lower than that of intergrinding. There is no significant effect of the slag cooling rate on grinding parameters and mineralogy of samples. In addition, in

this study, alternative grinding circuits were designed for the grinding of steel slags obtained in very coarse fractions. For this study, conventional techniques were used with simulation techniques.

Keywords: Steel slag, cement, compressive strength, grindability

Advisor: Assoc.Prof. A. Hakan BENZER
Hacettepe University, Department of Mining Engineering, Mineral Processing
Division

TEŞEKKÜR

Çalışmalar süresince bölüm imkanlarından yararlanmamı sağlayan Maden Mühendisliği Bölüm Başkanı, Sayın Prof.Dr. A.Erhan TERCAN'a,

Çalışmanın yapılması sırasında göstermiş olduğu yakın ilgi, her türlü yönlendirici ve yapıcı yardımlardan dolayı tez danışmanı, Sayın Doç.Dr. A.Hakan BENZER'e,

Numune temininde göstermiş olduğu kolaylıktan dolayı, Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş.'ne ve AR-GE Müdürlüğünde görevli, Sayın Dr. Birol SÖNMEZ'e,

SET Anadolu Çimentoları T.A.Ş. Ambarlı Çimento Öğütme Tesisleri Operasyon Şefi, Sayın Ramazan ABAY'a,

Deneyisel çalışmalar kısmında, büyük katkısı olan Araş.Gör. Okay ALTUN'a,

Tez yazım aşamasındaki yardımlarından dolayı Dr. Abdullah OBUT'a,

Yardımlarından dolayı laboratuvar teknisyenimiz Mustafa YILMAZ'a,

Her türlü konuda destek olan çimento öğütme grubunda yer alan araştırma görevlilerine,

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olan arkadaşlarım, Özlem Bıçak, Çağrı Başaran ve Onur Atakay'a,

Sevgili aileme ve dostlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
5.1. Çimento Dayanım Testleri	45
5.2. Kimyasal ve Mineralojik Analiz.....	47
5.3. Öğütme ve Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi	47
5.3.1. Standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi değerinin belirlenmesi.....	47
5.3.2. Kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi	48
6. DENEYSEL SONUÇLAR	50
6.1. Çimento Dayanım Testleri	50
6.2. Kimyasal ve Mineralojik Bileşim.....	51
6.3. Öğütme ve Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi	59
6.3.1. Standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi değerleri.....	59
6.3.2. Kırılma dağılım fonksiyonları	64
6.3.3. Kırılma hızı parametreleri	64
7. ÇELİKHANE CÜRUFU İÇİN ÖĞÜTME DEVRESİ TASARIMI.....	68
7.1. Çelikhane Cürufunun Öğütme Devresine Hazırlanması – Kırma Devresi....	69
7.2. Konvansiyonel Bond Yöntemi ile Değirmen Tasarımı.....	69
7.3. Simülasyon ile Devre Tasarımı	70
8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	74
9. YORUM ve ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR DİZİNİ	86
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Demir-Çelik Üretimi.....	3
Şekil 2.2. Bessemer Dönüştürücüsü	4
Şekil 2.3. Siemens-Martin Prosesi.....	4
Şekil 2.4. Bazık Oksijen Fırını.....	5
Şekil 2.5. Elektrik Ark Fırını	6
Şekil 2.6. Yıllara göre proses bazında demir ve çelik üretimindeki gelişim.....	6
Şekil 2.7. Çelikhane cürufunun bazıklığı ile çelikhane cürufu katkılı çimentonun basma dayanımı arasındaki ilişki.....	13
Şekil 2.8. PÇCYFCÇ harçlarının uzun dönemde dayanım gelişimi	14
Şekil 2.9. PÇCUKÇ harçlarının dayanım gelişimi	15
Şekil 2.10. Alkali ile aktive edilmiş çelikhane-yüksek fırın cürufu harçlarının dayanım gelişimi.....	16
Şekil 3.1. Çimento Üretim Hattı	19
Şekil 3.2. Hammadde öğütme değirmeninin genel görünümü	27
Şekil 3.3. Çimento öğütmede kullanılan kamaralı bir değirmenin kesit görünümü.....	28
Şekil 3.4. Dik Değirmen	29
Şekil 3.5. Yüksek Basıncılı Merdaneli Pres	30
Şekil 3.6. Horomill	31
Şekil 3.7. Düşey milli darbeli kırıcı çalışma prensibi	32
Şekil 4.1. Tek bir tane boyu fraksiyonu için kütle denklığı.....	38
Şekil 4.2. Mükemmel karışım bilyalı değirmen modeli kırılma mekanizması	40
Şekil 4.3. Çok bölmeli değirmen modelleme yaklaşımının şekilsel gösterimi	42
Şekil 5.1. Ağırlık düşürme test düzeneği	49
Şekil 6.1. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni.....	52
Şekil 6.2. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni	52
Şekil 6.3. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni	53
Şekil 6.4. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni	53
Şekil 6.5. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	55
Şekil 6.6. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	55
Şekil 6.7. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	56
Şekil 6.8. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	56
Şekil 6.9. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü.....	57
Şekil 6.10. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü.....	57
Şekil 6.11. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	58
Şekil 6.12. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü	58
Şekil 6.13. Kendiliğinden soğuyan çelikhane cürufu katkılı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları	60
Şekil 6.14. Hızlı soğuyan çelikhane cürufu katkılı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları	61
Şekil 6.15. Yavaş soğuyan çelikhane cürufu katkılı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları	62
Şekil 6.16. Karıştırılarak soğutulan çelikhane cürufu katkılı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları	63

Şekil 6.17. Klinker ve çelikhane cüruflarına ait kırılma dağılım fonksiyonları.....	64
Şekil 6.18. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi	65
Şekil 6.19. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi	65
Şekil 6.20. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi	66
Şekil 6.21. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi	66
Şekil 6.22. %20 çelikhane cürufu katkılı karışımlara ait kırılma hızları	67
Şekil 7.1. Çelikhane cürufu için tasarlanan iki aşamalı kırma devresi	69
Şekil 7.2. Çimento öğütme devresi akım şeması.....	70
Şekil 7.3. Madde denkliği sonucunda hesaplanan tane boyu dağılımları ile ölçülen tane boyu dağılımları arasındaki ilişki.....	71
Şekil 7.4. Cüruf katkı oranı ile kapasite ve spesifik enerji tüketimindeki değişim...	73
Şekil 8.1. Cüruflara ait iş indeksi değerleri	75
Şekil 8.2. Cüruf katkı oranına bağlı olarak iş indeksi değerlerindeki değişim	76
Şekil 8.3. Ölçülen ve hesaplanan iş indeksi değerleri.....	77
Şekil 8.4. Yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri	79
Şekil 8.5. Çelikhane cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri	80
Şekil 8.6. Çelikhane cürufu+yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri	80
Şekil 8.7. Aynı katkı oranına sahip, 3000 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri.....	81
Şekil 8.8. Aynı katkı oranına sahip, 3500 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri.....	81
Şekil 8.9. Aynı katkı oranına sahip, 4000 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri.....	82
Şekil 8.10. 3500 Blaine incelikteki çelikhane cürufu, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu+yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Çelikhane cürufunun kimyasal bileşim sınırları.....	7
Çizelge 2.2. Çelikhane cüruflarının içerdiği fazlar.....	10
Çizelge 2.3. Çelikhane cüruflarının hidrolik reaktivite, baziklik ve içerdiği fazlar....	10
Çizelge 2.4. Kontrol çimentosu, PÇCUKÇ1 ve PÇCUKÇ2 numunelerine ait karışım oranları	15
Çizelge 3.1. Klinkerin kimyasal kompozisyonu	20
Çizelge 3.2. Klinkerin içerdiği fazlar.....	21
Çizelge 3.3. Çimento tiplerine ait bileşim değerleri.....	22
Çizelge 3.4. Dayanım sınıflarına ait mekanik ve fiziksel özellikler	23
Çizelge 5.1. Karışım miktarları ve cüruf incelikleri	46
Çizelge 5.2. Hazırlanan çimento örneklerinin karışım oranları ile incelik ve yoğunluk değerleri	47
Çizelge 5.3. Ağırlık düşürme testine ilişkin standart test koşulları	49
Çizelge 6.1. Çimentolara ait basma dayanımı, priz süresi ve hacim genleşmesi değerleri	50
Çizelge 6.2. Çimento numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları	50
Çizelge 6.3. Klinker ve cüruf numunelerinin kimyasal kompozisyonu.....	51
Çizelge 6.4. Cüruf/Klinker karışımlarına ait iş indeksi değerleri.....	59
Çizelge 7.1. Bilyalı değirmen teknik verileri	70
Çizelge 7.2. Bilyalı değirmen ve havalı separatör model parametreleri.....	72
Çizelge 7.3. Bilyalı değirmen teknik verileri	72

1. GİRİŞ

Proses artıklarının veya yan ürünlerinin farklı endüstrilerde hammadde kaynağı olarak kullanımı, atık bertarafı, maliyet azaltımı, etkin kaynak kullanımı ve benzeri nedenlerden ötürü günümüz teknolojilerinin önemli unsurlarından birini oluşturmaktadır.

Endüstriyel atıkların değerlendirilmesi kavramı çevresel ve ekonomik katkıları nedeniyle son yıllardaki en önemli konulardan biri haline gelmiştir. Özellikle Kyoto Protokolü'nü takiben ülkelerin CO₂ emisyon değerlerini 2008-2012 yılları arasında 1990'daki değerlere düşürmek zorunda olmaları atık hammadde kaynaklarına olan ilgiyi daha da arttırmaktadır.

Çimento endüstrisi de bu atık kaynakların değerlendirildiği önemli alanlardan bir tanesidir. Yüksek fırın cürufu, silis dumanı, uçucu kül, kullanılmış otomobil lastikleri gibi pek çok endüstriyel atık çimento endüstrisinde hammadde veya yakıt kaynağı olarak kullanılmakta ve buna bağlı olarak farklı tipte çimentolar üretilmektedir.

Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri, elde edildikleri tesisin ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Demir çelik fabrikaları yan ürünlerinden olan çelikhane cürufu, çelik üretim prosesinde, ergimiş haldeki demirin safsızlıklardan arındırılması aşamasında elde edilmektedir.

Çelikhane cüruflarının farklı endüstriyel tesislerde kullanımı için çeşitli araştırmalar yürütülmektedir. Çelikhane cürufunun farklı endüstriyel alanlarda kullanılabilirliğinin belirlenmesindeki en önemli faktörlerden bir tanesi işlemin ekonomik katkılarıdır.

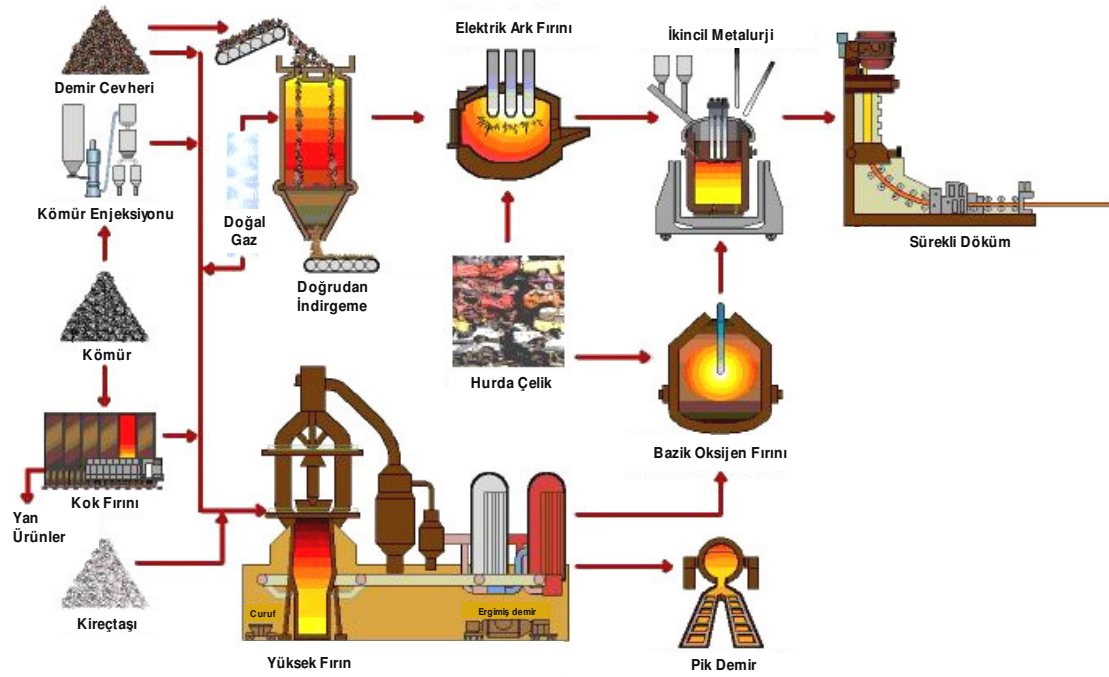
Günümüzde, endüstriyel cürufların büyük bir kısmı, özelliklerinden tam anlamıyla yararlanılmadan kullanılmakta veya kullanılmadan atılmaktadır. Bağlayıcı veya puzolanik özelliğe sahip endüstriyel cüruflar, agrega veya balast olarak kullanılmak yerine, portland çimentosu üretiminde özellikle enerji tüketimine bağlı yüksek maliyetlerden dolayı kısmen çimento ikamesi olarak kullanılmalıdır.

Gereken ölçüde hızlı soğutulmuş demir-çelik cürufları, fosfor cürufu, bakır cürufu ile kurşun cürufu bağlayıcı ve puzolanik özelliklere sahiptir. Bu cürufların çimento bileşeni olarak kullanılabilirmeleri için sadece öğütölmeleri gerekmekte ve portland çimentosu üretimiyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır. Örneğin; granüle yüksek fırın cürufunu öğütmek için gereken enerji miktarı, Portland çimentosu üretmek için gereken toplam enerji miktarının yaklaşık olarak %10'u kadardır (Shi and Qian, 2000).

Tez kapsamında, endüstriyel atıkların değerlendirmesi yönünden, çelikhane cüruflarının çimento sanayiinde kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma süresince, çelikhane cürufu katkılı çimento üretiminde göz önünde bulundurulması gereken; son ürün kalitesi, enerji tüketimi gibi faktörler incelenmiştir.

2. ÇELİK ÜRETİM PROSESİ

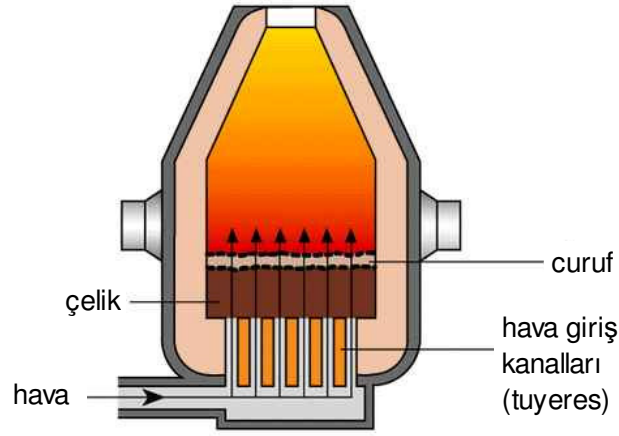
Çelik üretimi temel olarak, demirdeki safsızlıkların oksitlenerek uzaklaştırılmasını kapsamaktadır. Farklı çelik üretim proseslerine bağlı olarak kullanılan metal de değişiklik göstermektedir. Çelik üretiminde; prosese bağlı olarak, yüksek fırından çıkan pik demir, hurda metal veya sünger demir ana hammadde olarak kullanılmaktadırlar. Tipik bir modern entegre demir-çelik tesisine ait akım şeması Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Demir-Çelik Üretimi

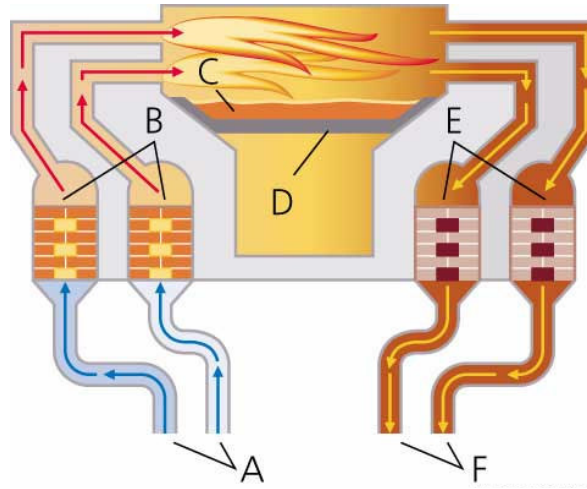
Çelik üretiminde ilk olarak Bessemer Prosesi geliştirilmiş, sonrasında Siemens-Martin Prosesi (open-hearth), oksijen üflemleri teknikler ve son olarak da Elektrik Ark Fırını yöntemi geliştirilmiştir.

Bessemer prosesinde, fırınının alt kısmında yer alan kanallardan ergimiş pik demir boyunca hava üflenerek silisyum, manganez ve karbon gibi safsızlıklar oksitlenerek cüruf fazına alınmakta ve böylelikle saflaştırma gerçekleştirilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Bessemer Dönüştürücüsü

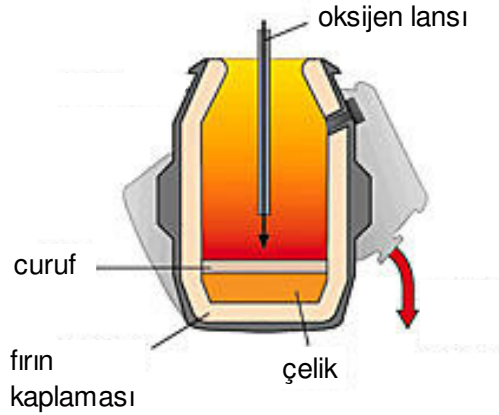
Siemens-Martin prosesinde, pik demir hurda çelikle birlikte ergitilip saflaştırılmaktadır. Ergitme işlemi için gereken ısı miktarını sağlamak için sıcak baca gazları sisteme geri döndürülmektedir. Sıcak baca gazları, fırın içerisindeki tuğla içeren bir dizi bölmeden geçirilir, tuğlalar tarafından soğurulan ısı fırına verilen yakıtı ve havayı ısıtmak için kullanılmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Siemens-Martin Prosesi; A. gaz ve hava girişi, B. önceden ısıtılmış bölme, C. ergimiş pik demir, D. ocak (hearth), E. ısıtma bölmesi, F. gaz ve hava çıkışı

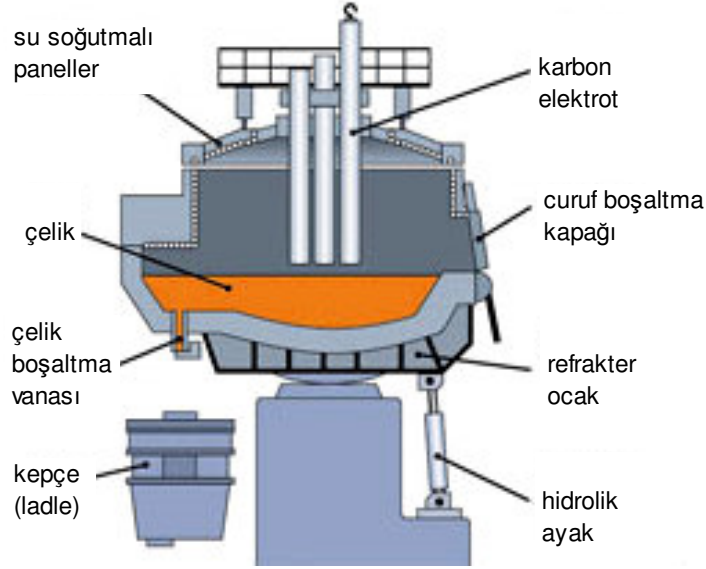
Hava üflemleri tekniklerde, kullanılan havanın, oksijen içeren, hacimce %20'lik kısmı safsızlıkların oksitlenmesini sağlamakta ve geri kalan, başlıca azottan oluşan, %80'lik kısım ise fırına soğuk girip sıcak olarak terk etmektedir. Bu da ısının dışarı taşınarak prosesin termal verimliliğini düşürmektedir. Oksijen üflemleri teknikler geliştirilerek bu problem ortadan kaldırılmıştır (Higgins, 1983).

Bazik oksijen prosesinde; ergimiş haldeki pik demir ve hurda metal kullanılır. Fırın içerisine yüksek basınçta, safa yakın derecede oksijen gazı verilerek yaklaşık 1700°C'lik bir sıcaklığa erişilir. Bu sıcaklık hurda metalin ergimesine ve karbonun uzaklaşmasına sebep olur. Yanma sonrası açığa çıkan safsızlıklar fırına ilave edilen ergiticiler (kireç veya dolomit) ile tepkimeye girerek cüruf fazını oluşturur. Cürufu meydana getiren bu safsızlıklar; karbon (karbon monoksit formunda), silisyum, manganez, fosfor ve az miktarda sıvı halde demir oksitlerden oluşmaktadır (Şekil 2.4).



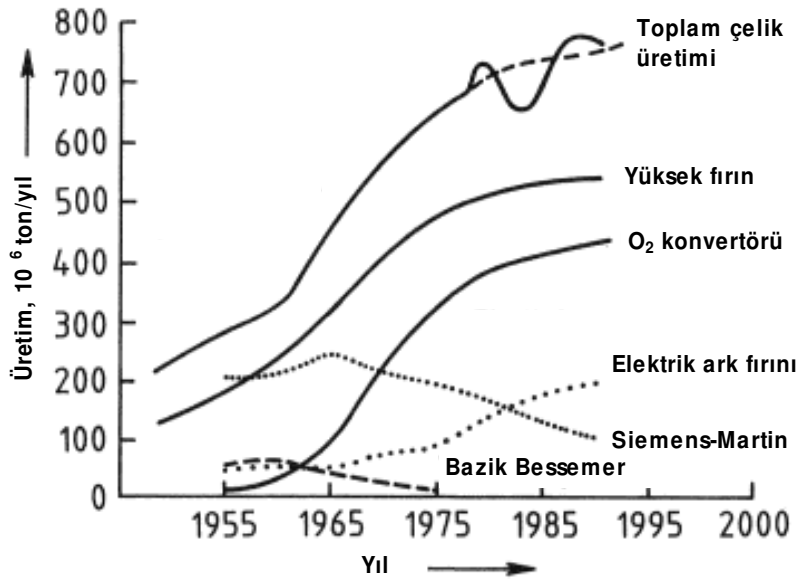
Şekil 2.4. Bazik Oksijen Fırını

Elektrik ark fırını prosesinde, çeliğin ergimesi ve saflaştırılması için gereken ısı yanma yerine elektrik enerjisi ile sağlanmaktadır. Hurda metal ve kireçle doldurulan fırın içerisine fırın kapağında yer alan elektrotlar indirilir. Elektrotlardan geçen elektrik akımı, hurda metal ve elektrotlar arasında ark yaparak hurda metalin ergimesi için gereken yüksek ısıyı ortaya çıkarır. Hurda metaldeki karbon, silisyum, manganez gibi safsızlıkları oksitlemek için sisteme oksijen verilir. Oksit formundaki bu safsızlıklar kireçle birleşerek cürufu meydana getirmektedirler (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Elektrik Ark Fırını

Şekil 2.6'da yıllara göre dünya pik demir ve çelik üretiminin proses bazında gelişimi verilmektedir. Modern çelik üretiminde eski tekniklerin yerini, Bazik Oksijen ve Elektrik Ark Fırınları almıştır.



Şekil 2.6. Yıllara göre proses bazında demir ve çelik üretimindeki gelişim (Schafer, 2003)

2.1. Çelikhane Cürufu

Entegre demir-çelik tesislerinde yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu yan ürünlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır.

Demir-çelik fabrikalarında, çelik üretimi sırasında ton başına yaklaşık 400 kg cüruf ortaya çıkmaktadır. Bu cürufun, yaklaşık 300 kg'ını yüksek fırın cürufu, 100 kg'ını ise çelikhane cürufu oluşturmaktadır (Suk et al., 2006).

Çelikhane cürufu, çelik üretimi sırasında pik demirdeki safsızlıkların oksitlenmesi sonucu ortaya çıkan bir yan üründür. Farklı çelik üretim yöntemlerine bağlı olarak farklı tipte çelikhane cürufları ortaya çıkmakta olup bu cüruflar benzer özellik göstermektedirler.

2.1.1. Çelikhane cürufunun kimyasal kompozisyonu

Çelikhane cüruflarının kimyasal bileşiminde başlıca CaO, MgO, SiO₂ ve FeO bulunmaktadır.

Tipik bir çelikhane cürufunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.1'de verilmektedir (Xuequan et al., 1999).

Çizelge 2.1. Çelikhane cürufunun kimyasal bileşim sınırları

Bileşen	%
CaO	45-60
SiO ₂	10-15
Al ₂ O ₃	1-5
MgO	3-13
Fe ₂ O ₃	3-9
FeO	7-20
P ₂ O ₅	1-4

2.1.2. Çelikhane cürufunda soğutma işlemi

Ergimiş haldeki çelikhane cürufunun soğutulması için çeşitli yöntemler mevcuttur.

- Kendi halinde soğuma
- Püskürtme su ile soğutma
- Suyla soğutma (Water Quenching)
- Havayla soğutma (Air Quenching)
- Sığ havuz yöntemi (Shallow Box Chilling)

Kendiliğinden soğumada, ergimiş haldeki çelikhane cürufu bir sahaya dökülmekte ve cüruf kendi halinde soğumaktadır. Soğuyan cüruf iri parçalardan ve toz halinde malzemeden oluşmaktadır. Soğuma sırasında, yaklaşık 675°C sıcaklıkta β -2CaO.SiO₂ (β -C₂S)'in γ -2CaO.SiO₂ (γ -C₂S)'e dönüşmesi sonucu toz halinde ince cüruf parçacıkları meydana gelmektedir. β -C₂S ve γ -C₂S farklı kristal yapıya ve yoğunluğa sahip olduklarından dönüşüm sırasında %10'luk bir hacim genişmesi meydana gelmekte ve kristaller ufalanarak toz haline gelmektedir (Shi, 2004).

Püskürtme su ile soğutma işleminde, ergimiş haldeki çelikhane cürufu bir sahaya dökülmekte ve katılaşma başladıktan sonra yüzeyine su püskürtülmektedir. Sıcaklığındaki ani değişimden dolayı cüruf kendiliğinden kırılarak daha küçük parçalara ayrılmaktadır. Bu yöntemle, β -C₂S'in γ -C₂S'e dönüşmesi kısmen engellenmektedir (Shi, 2004).

Suyla soğutma yöntemi (granülizasyon), yaygın olarak yüksek fırın cürufunun soğutulması için kullanılmaktadır. Çelikhane cüruflarının yüksek fırın cürufuna göre daha az akıcı olması bu yöntemin çelikhane cüruflarında kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu yöntemde ergimiş haldeki cüruf, su jetleri ile su spreylelerinin bulunduğu sistemden geçerek granül haline gelmektedir. Ergimiş haldeki çelikhane cürufunun içinde hapsolan su, buharlaşarak patlamalara sebep olmakta ve bunun sonucunda, suyla soğutulan çelikhane cürufları boyutu 3 ile 5 mm arasında değişen küçük parçalardan oluşmaktadır (Shi, 2004).

Havayla soğutma yöntemi, Chongqing Iron and Steel Co. Ltd. (Çin Halk Cumhuriyeti) tarafından yakın zamanda geliştirilmiştir. Ergimiş haldeki çelikhane cürufu, alt tarafında hava girişi için açıklık bulunan huniye dökülmektedir. Daha sonra, alt taraftaki hava girişinden basınçlı hava üflenmektedir. Boyutu 3-5 mm arasında değişen küçük taneler haline gelen cüruf suyla dolu bir havuza düşer. Bu yöntem sonucunda bir çok metal oksitlenmektedir. Havayla soğutulan çelikhane cürufunun öğütülmesi, kendi halinde soğuyan ve püskürtme su ile soğutulan çelikhane cürufuna göre daha zor olmaktadır (Shi, 2004).

Sığ havuz yöntemi, Japonya'da geliştirilmiştir. Ergimiş haldeki çelikhane cürufu yaklaşık 100 mm kalınlığında olacak şekilde bir çeşit tavaya dökülmekte ve 4 dakika boyunca soğutulmaktadır. Daha sonra yaklaşık 20 dakika boyunca üzerine su püskürtülerek sıcaklığı 500°C'ye kadar düşürülmektedir. Bu birincil su püskürtme işleminden sonra, cüruf bir sonraki su püskürtme işlemi için farklı bir yere taşınarak 4 dakika boyunca üzerine su püskürtülür ve sıcaklığı 200 °C'ye kadar düşürülür. Son aşamada, cüruf ileri soğutma için su havuzuna konulur. Bu yöntemle soğutulan cüruf 30-50 mm tane boyuna sahip parçalardan oluşmakta olup düşük kireç içeriğine (%2-4) sahiptir. Oldukça ince bir cüruf tabakası üzerine su püskürtüldüğünden dolayı, buhar oluşumuna bağlı patlamalar önlenmiş olur (Shi, 2004).

2.1.3. Çelikhane cürufunun mineralojik bileşimi

Kullanılan hammaddenin içeriğine, hatta işlem ısısına bağlı olarak çelikhane cürufunun kimyasal bileşimindeki önemli değişim dikkate alındığında, mineralojik bileşiminin de farklı olması beklenmektedir. Çelikhane cürufları başlıca; olivin, mervinit, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S), $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ($\beta\text{-}\text{C}_2\text{S}$), $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ($\gamma\text{-}\text{C}_2\text{S}$), $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF), $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_2F) mineralleri ile RO fazı ($\text{CaO}\text{-}\text{FeO}\text{-}\text{MnO}\text{-}\text{MgO}$ katı çözeltilisi) ve serbest $\text{CaO}\text{-}\text{MgO}$ içermektedir. Çizelge 2.2'de farklı çelikhane cüruflarında sıklıkla oluşumu gözlenen fazlar verilmektedir (Shi, 2004).

Çizelge 2.2. Çelikhane cüruflarının içerdiği fazlar

Fazlar	Kimyasal Formülü	Kısaltma
Mervinit	$3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	C_3MS_2
Alit	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Belit	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\beta\text{-C}_2\text{S}, \gamma\text{-C}_2\text{S}$
Rankinit	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$	C_3S_2
Vollastonit	$\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	CS
Diopsit	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$	CMS_2
Montiselit	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	CMS
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
Kalsiyum alüminat	$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	CA
Kalsiyum ferrit	$\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	CF
Forsterit	$2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$	M_2S
Sülfürlü mineraller	CaS, MnS, FeS	-
RO fazı	$\text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO}$	RO
Kireç	CaO	-
Periklaz	MgO	-
Diğer	FeO, Fe_2O_3	-

2.1.4. Çelikhane cürufunun hidrolik bağlayıcı özelliği

C_3S , C_2S , C_4AF ve C_2F bileşiklerinin varlığı çelikhane cürufunun bağlayıcı özellik kazanmasına sebep olmaktadır. Çelikhane cürufunun bazikliği, ana mineral fazı ve hidrolik reaktivitesi arasındaki ilişki Çizelge 2.3'te özetlenmiştir (Shi, 2004).

Çizelge 2.3. Çelikhane cüruflarının hidrolik reaktivite, baziklik ve içerdiği fazlar

Hidrolik özellik	Baziklik		Ana fazlar
	CaO/SiO ₂	CaO/(SiO ₂ +P ₂ O ₅)	
Düşük	0,9-1,5	0,9-1,4	Olivin, RO fazı, mervinit
	1,5-2,7	1,4-1,6	Mervinit, C_2S , RO fazı
Orta		1,6-2,4	C_2S , RO fazı
Yüksek	>2,7	>2,4	C_3S , C_2S , C_4AF , C_2F , RO fazı

Çelikhane cürufunun hidrolik aktifliği bazikliği ile birlikte artmaktadır. Bununla birlikte serbest CaO içeriğinin artışı ile de beklendiği gibi baziklik artmaktadır. C_3S içeriği Portland çimentosuna göre daha düşük olan çelikhane cürufu zayıf Portland

çimentosu klinkeri olarak nitelendirilmektedir. Yapılan bir çalışmada çelikhane cürufunun su ile reaksiyona girdiği ve ortamdaki NaOH'ın hidratasyonu hızlandırdığı saptanmıştır (Shi, 2004).

2.1.5. Çelikhane cürufunun kullanım alanları

Çelikhane cürufları genellikle yapı agregası ve dolgu malzemesi olarak veya tarımsal alanların ıslahında kullanılmaktadır.

Bir çok araştırma sonucunda çelikhane cüruflarının bağlayıcı özellik gösterdiği kanıtlanmış ve zayıf çimento klinkeri olarak adlandırılmıştır. Fakat buna rağmen bir çok ülkede çelikhane cürufları halen beton asfalt agregası olarak kullanılmaktadır. Yaygın olmamakla birlikte, fakat gün geçtikte yaygınlaşması beklenen, çimento endüstrisinde kullanımına yönelik uygulamalar da bulunmaktadır (Shi, 2004).

Ana katkı malzemesi olarak çelikhane cürufunun kullanıldığı, çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı özel çimentolar 20 yılı aşkın bir süredir Çin Halk Cumhuriyeti'nde ticari olarak pazarlanmakta ve toplam çelikhane cüruf üretiminin yaklaşık %40'ı kullanılmaktadır. Bu tip çimentolar, Portland çimentosuna kıyasla düşük enerji maliyeti, yüksek aşınma direnci, düşük hidratasyon ısı ve ileri yaşlarda yüksek dayanım gibi avantajlara sahip olmakla birlikte uzun priz alma süresi ve düşük erken dayanım kazanımı dezavantajlarıdır (Shi and Quian, 2000).

Çelikhane cüruflarının çimento endüstrisinde kullanımına yönelik araştırmalar halen devam etmektedir. Bu araştırmalar kapsamında, çelikhane cürufunun çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılmasında iki yöntem daha ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerden ilkinde çelikhane cürufu doğrudan çimento hammaddesine belirli bir oranda katılarak, farin değirmeninde beraber öğütülerek prosese sokulmaktadır. İkinci yöntemde ise tane boyu 20 mm'ye kadar olan çelikhane cürufu döner fırının besleme veya çıkış ucundan fırına beslenerek prosese sokulmaktadır. İkinci yöntemde klinker üretiminde yaklaşık %15'e kadar bir artış sağlanmakta ve CO₂ ile NO_x emisyonları düşmektedir (CemStar Process, U.S. Patent No. 5,421,880 (1995); 5,494,515 (1996)).

2.1.5.1. Çelikhane cürufu katkılı çimentolar

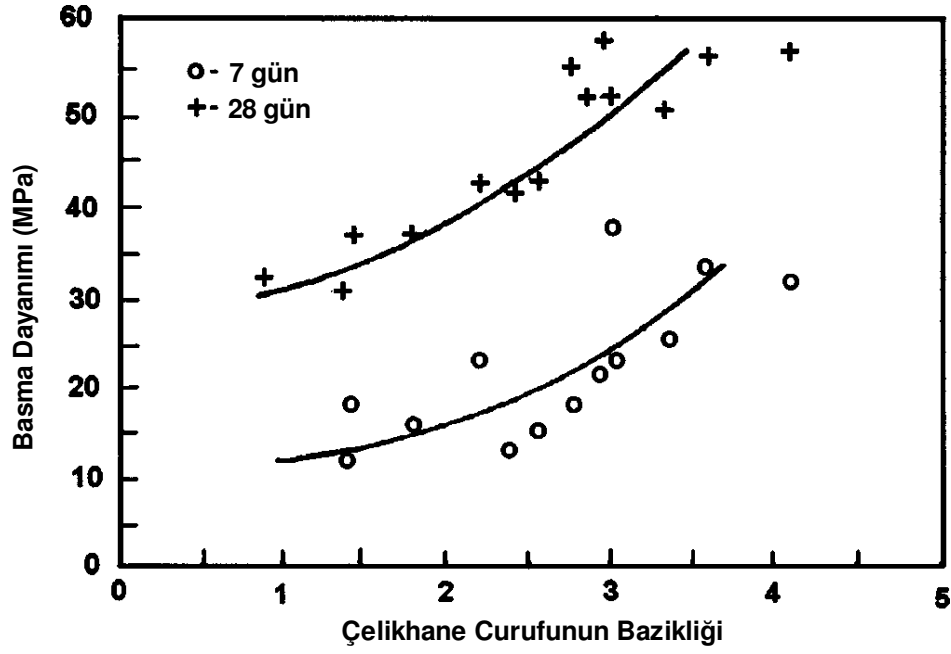
Portland-Çelikhane Cürufu-Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu (PÇCYFCÇ)

Yaklaşık %30 çelikhane cürufu, %30 granüle yüksek fırın cürufu, %35 çimento klinkeri ve %5 alçı içeren özel Portland-çelikhane cürufu-yüksek fırın cürufu çimentosu 20 yıldan fazla bir süredir Çin Halk Cumhuriyeti'nde ticari olarak pazarlanmaktadır. Bu tip çimento, Portland çimentosuyla karşılaştırıldığında; uzun priz alma süresi, düşük erken dayanım gibi dezavantajlara fakat düşük enerji maliyeti, yüksek aşınma direnci, düşük hidrasyon ısı, yüksek ileri yaş dayanımı ve sülfat etkisine dayanıklılık gibi avantajlara sahiptir.

1980'lerde PÇCYFCÇ üretiminde, Çin'in toplam çelikhane cürufu üretiminin %40'ı tüketilmekteydi.

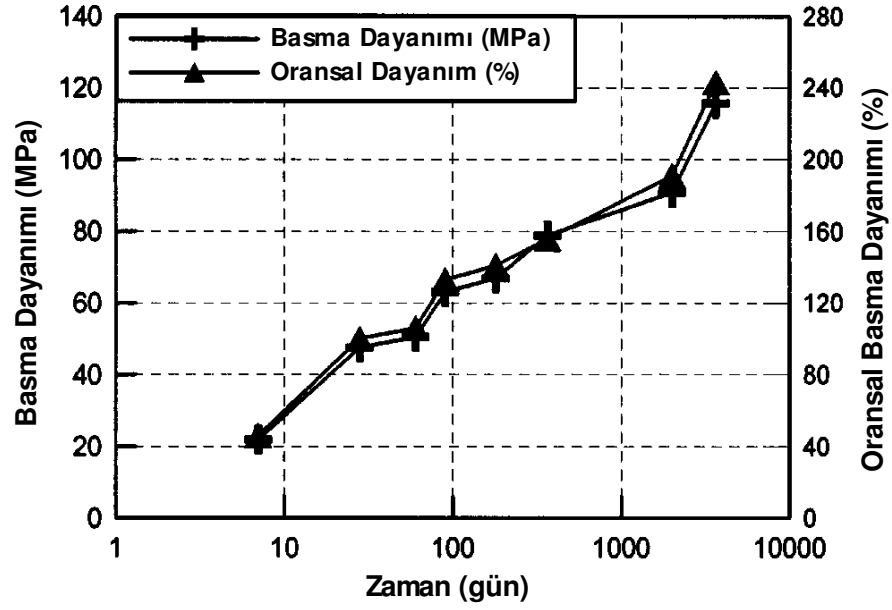
Çin Ulusal Standardı GB 13590-92 (1992), çelikhane ve demir cürufu çimentolarının kompozisyonunu, özelliklerini, test koşullarını, stoklanmalarını ve uygulamalarını detaylı bir biçimde belirtmektedir. Diğer bir standart YB/T 022-92 (Çin Metalurjik Endüstri Bakanlığı, 1992) ise PÇCYFCÇ üretiminde kullanılabilecek çelikhane cürufunun bileşimi, kalitesini, test koşullarını ve depolanmasını detaylı olarak belirtmektedir.

PÇCYFCÇ'nin erken dayanımı kullanılan çelikhane cürufunun bazikliğine bağlı olarak değişmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Çelikhane cürufunun bazıklığı ile çelikhane cürufu katkılı çimentonun basma dayanımı arasındaki ilişki

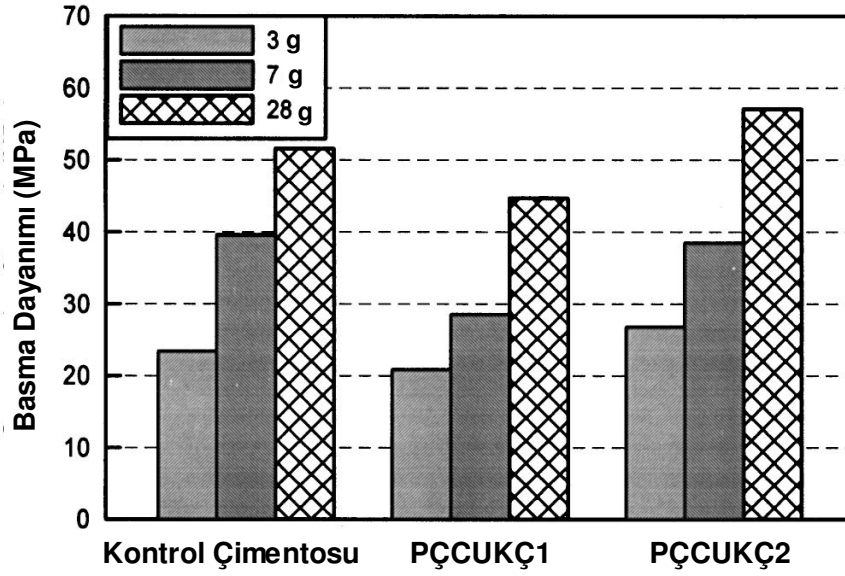
Hidratasyon süresinin artışı ile, PÇCYFCÇ'nin dayanımı sürekli artmaktadır. Şekil 2.8 10 yıllık bir dönemde PÇCYFCÇ harçlarının dayanımındaki artışı göstermektedir. Portland çimentosu harçlarının, 28 günlük dayanım değeri, ulaşabileceği en son dayanım değerinin yaklaşık %80'i kadardır. Fakat, PÇCYFCÇ harçlarının 28 günlük basma dayanımı 47,5 MPa olup 10 yıl sonunda 116 MPa'a ulaşmaktadır. 28 günlük dayanımı %100 kabul edildiğinde 10 yıl sonunda ulaşılacak dayanım %243 olmaktadır (Shi, 2004).



Şekil 2.8. PCCYFCÇ harçlarının uzun dönemde dayanım gelişimi

Portland-Çelikhane Cürufu-Uçucu Küllü Çimento (PCCUKÇ)

Bir çok ülkede, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu yaygın bir biçimde çimento katkı malzemesi olarak kullanılmakta olup maliyeti uçucu küle oranla daha yüksektir. Araştırmalar sonucunda uçucu külün çelikhane cürufuyla birlikte kullanılabileceği ve genleşme problemini ortadan kaldırarak yeterli dayanım verebileceği gözlemlenmiştir. Şekil 2.9'da PCCUKÇ harçlarının 3, 7, 28 günlük dayanımları verilmektedir.



Şekil 2.9. PÇCUKÇ harçlarının dayanım gelişimi

Şekil 2.9'da yer alan kontrol çimentosu, PÇCUKÇ1 ve PÇCUKÇ2 numunelerine ait karışım oranları Çizelge 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Kontrol çimentosu, PÇCUKÇ1 ve PÇCUKÇ2 numunelerine ait karışım oranları

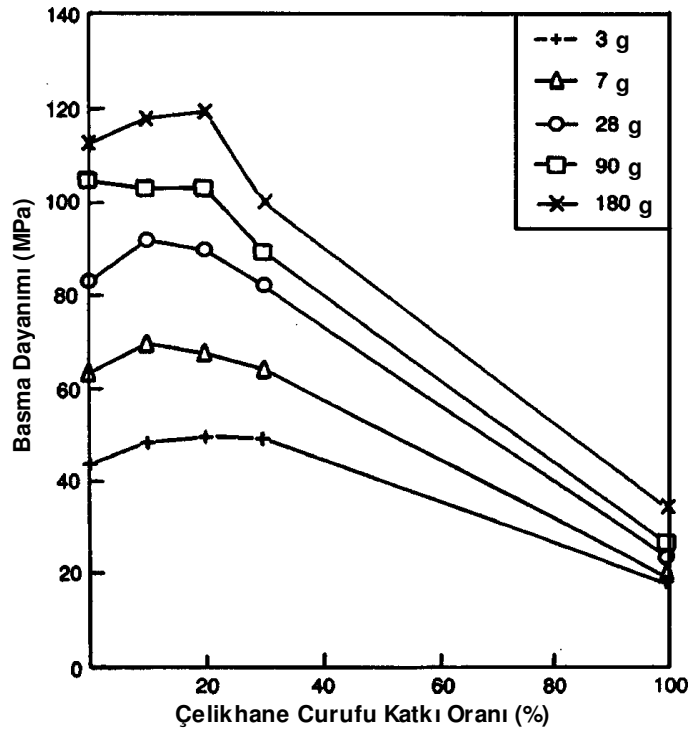
Numune Adı	% Ağırlık				
	Klinker	Alçı	Çelikhane Cürufu	Uçucu Kül	Yüksek Alüminalı Çimento
Kontrol Çimentosu	93	7	-	-	-
PÇCUKÇ1	45	5	30	20	-
PÇCUKÇ2	45	3	30	20	2

PÇCUKÇ, kontrol çimentosuna göre biraz daha düşük dayanım vermektedir. Fakat, %2'lik alçı miktarı yüksek alüminalı çimentoyla yer değiştirdiğinde ise (PÇCUKÇ2), 3 ve 28 günlük dayanımı kontrol çimentosuna göre daha yüksek olmaktadır. 7 günlük dayanımda ise herhangi bir fark gözlemlenmemektedir. Ayrıca PÇCUKÇ kontrol çimentosuna kıyasla düşük kuruma küçülmesi ve korozyona karşı daha iyi direnç göstermektedir (Shi, 2004).

Alkali-Aktiveli Çelikhane Cürufu-Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu

Yüksek fırın cüruflarının, aktive edici uygun alkali malzemeler kullanılarak geleneksel çimentolara göre daha yüksek dayanım verdiği bilinmektedir. Öğütülmüş çelikhane cürufunun suyla temas etmesi sonucu düşükte olsa bağlayıcı özellik göstermekte ve aktive edici alkali malzemelerin varlığında ise daha yüksek bağlayıcı özellik göstereceği tahmin edilmektedir.

Şekil 2.10 yüksek fırın cürufuyla çelikhane cürufunun farklı oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen %5 Na₂O-1,7SiO₂ ile aktive edilmiş çelikhane-yüksek fırın cürufu harçlarının dayanımlarını göstermektedir.



Şekil 2.10. Alkali ile aktive edilmiş çelikhane-yüksek fırın cürufu harçlarının dayanım gelişimi

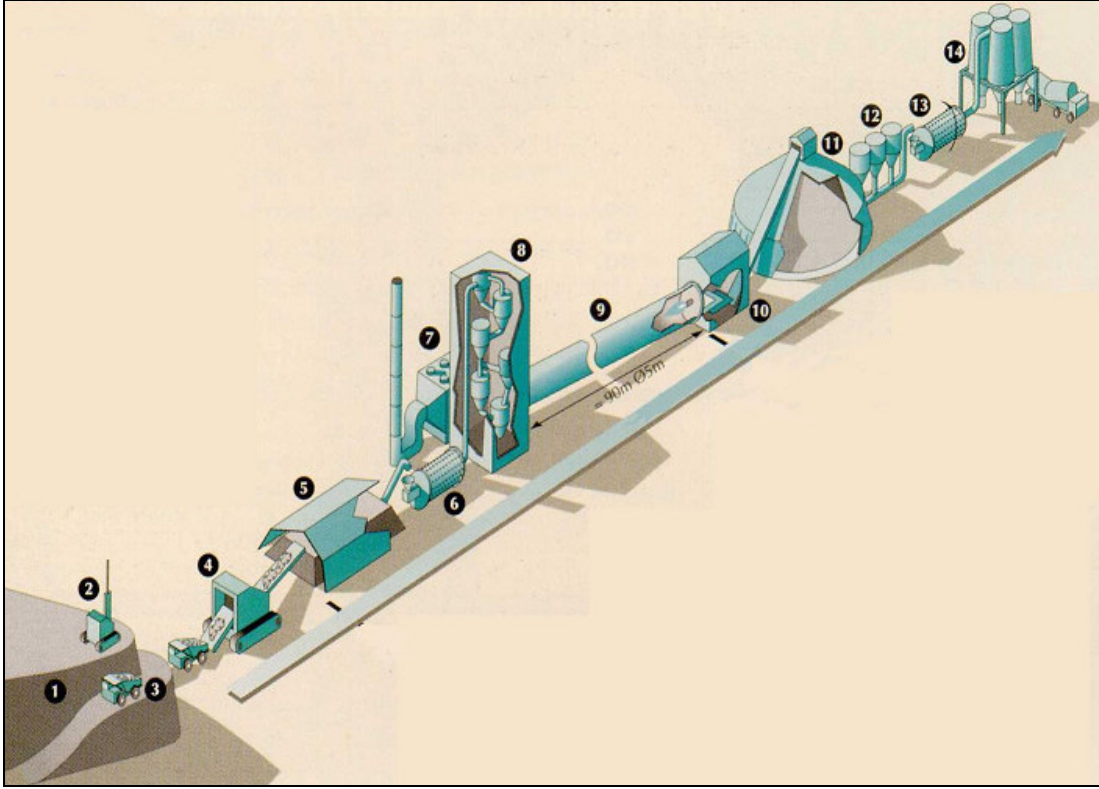
Alkali aktiveli yüksek fırın cürufu çimentosundaki yüksek fırın cürufunun %20'lik kısmının çelikhane cürufu ile yer değiştirmesi sonucunda saf yüksek fırın cürufu çimentosuna göre daha yüksek dayanım elde edilmektedir. Yer değiştirme miktarındaki artış çimento dayanım değerini azaltmaktadır.

Uygun miktarlarda yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu kullanılarak üretilen alkali aktiveli çelikhane-yüksek fırın cürufu pastalarının, alkali aktiveli saf yüksek fırın cürufu pastalarına göre daha yoğun bir yapıya sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca, çelikhane cürufunun uygun miktarda yüksek fırın cürufuyla yer değiştirmesi, çimento pastaları ile betondaki kuruma küçülmesini azaltmakta ve aşınmaya karşı direnci artırmaktadır. Yakın zamandaki çalışmalar sonucunda, alkali aktiveli çelikhane-yüksek fırın cürufu çimentolarının korozyona karşı mükemmel direnç gösterdiği saptanmıştır (Shi, 2004).

3. ÇİMENTO ÜRETİM PROSESİ

Kimyasal yapısında silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksit bulunan öğütülmüş marn, şist, kil gibi hammaddelerin sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile elde edilen yarı mamül madde klinker olarak adlandırılmaktadır. Havada ya da suda sertleşebilen, sertleştikten sonra suda çözünmeyen ve yarı mamül madde klinkerin bir veya birden fazla katkı maddesi ile öğütülmesi yoluyla üretilen ve hidrolik bağlayıcılar içeren malzemeye çimento adı verilmektedir (Taşkın, 1984). Çimento üretiminde uygun kimyasal bileşimi sağlamak için dört ana bileşen gereklidir. Bunlar; silisyum oksit (SiO_2), kalsiyum oksit (CaO), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve demir oksit (Fe_2O_3)'tir. Klinker üretim prosesinde, teorik olarak yalnızca kireçtaşı ve silisyum oksitin proseste bulunması yeterli olmakla birlikte, ürün kalitesini bozmadan klinkerin pişme sıcaklığını düşüren alüminyum oksit ve demir oksit prosesin ısı ekonomisi açısından işleme dahil edilmektedir. Ayrıca, çimento özelliklerini değiştirecek maddeler de proseste yerini almaktadır. Örneğin; betonun donma zamanını geciktirip işlenebilirliğini arttırmak amacıyla belirli bir orandaki (yaklaşık %5) alçı taşı klinker ile birlikte öğütülmektedir.

Şekil 3.1’de çimento üretimine ait bir akım şeması verilmektedir.



Şekil 3.1. Çimento Üretim Hattı : 1. Ocak, 2, 3. Madencilik İşleri 4. Kırıcı, 5. Ön Homojenizasyon, 6. Farin Değirmeni, 7. Filtre, 8. Ön Isıtıcı, 9. Döner Fırın, 10. Soğutucu, 11. Klinker Stoklama, 12. Katkılar, 13. Çimento Öğütme, 14. Çimento Siloları – Sevkiyat

Çimento üretiminde yaygın olarak kullanılan hammaddeler; kalker (kireçtaşı), kil, marn, şist ve jipstir. Çimento üretim süreci içerisinde, hammaddeden son mamüle kadar bu hammaddeler birçok prosesten geçmektedir. Farin olarak adlandırılan bu hammaddelerin hazırlanması madencilik işlemleri ile başlamaktadır. Madencilik işlemlerini, ocak çıkışı hammaddelerin kırıcılarda kırılıp farin değirmeninde öğütülmesi takip etmektedir. Boyut küçültme işlemine tabi tutulan hammaddeler, harmanlanarak malzeme homojenizasyonu sağlanır. Döner fırına beslenen bu hammadde karışımı belirli bir sıcaklık altında sinterleşirken, bileşenler arasındaki kimyasal tepkimelerin oluşturulabilmesi için ise tanelerin belirli bir yüzey alanına sahip olmaları gerekmektedir (Hansen, 1983). Bileşenler arasında meydana gelen kimyasal tepkimelerin hızlarını artırmak ve ısı transferini hızlandırmak için tanelerin özgül yüzeyinin yeterince büyük olmasını sağlamak amacıyla hammaddelerin

öğütülmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. Böylece, döner fırın beslemesinin homojenizasyonu kolay olmakta ve fırın içerisinde kimyasal tepkimeler daha hızlı gerçekleşmektedir. Hammadde öğütme işlemlerinde yaş veya kuru sistem kullanılabilmesine karşın, enerji maliyeti nedeniyle kuru sistem tercih edilmektedir (Malzig and Their, 1985).

Öğütülen hammaddelerin, sinterleşme derecesine kadar pişirilmesi ile klinker adı verilen yarı mamül elde edilmektedir. Beton dayanımındaki artışın uygun zaman içerisinde olması ve istenen dayanımın sağlanması için klinkerin belirli bir incelikte olması gerekmektedir. Bu nedenle, çimento üretiminde klinker, belirli bir özgül yüzey alanına sahip çimento elde etmek üzere kuru olarak öğütülmektedir. Klinkerin öğütülmesi sırasında katkı maddeleri ilave edilerek katkılı çimento üretimi de yapılmaktadır.

Klinkerin kimyasal kompozisyonu ve içerdiği fazlar sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Klinkerin kimyasal kompozisyonu (Duda, 1976)

Bileşen	%
SiO ₂	16-26
Al ₂ O ₃	4-8
Fe ₂ O ₃	2-5
Mn ₂ O ₃	0-3
TiO ₂	0-0,5
CaO	58-67
MgO	1-5
K ₂ O + Na ₂ O	0-1
SO ₃	0,1-2,5
P ₂ O ₅	0-1,5

Çizelge 3.2. Klinkerin içerdiği fazlar (Duda, 1976)

Klinker Fazları	Kimyasal Formülü	Kısaltma
Trikalsiyum silikat (alit)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Dikalsiyum silikat (belit)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiyum alüminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum alüminoferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF
Kalsiyum alüminoferrit	$2\text{CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2(\text{A}, \text{F})$
Serbest kireç	CaO	
Serbest magnezyum oksit	MgO	
Alkali içerikli alüminat	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{O} \cdot 8\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$	$(\text{K}, \text{N})\text{C}_8\text{A}_3$
Alkali sülfat	$(\text{K}, \text{Na})_2\text{SO}_4$	
Kalsiyum sülfat	CaSO_4	

3.1. Çimento Tipleri

Farklı kullanım amaçları doğrultusunda istenilen özellikleri sağlamak amacıyla çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak farklı tipte ve kalitede çimentolar üretilmektedir. Üretilen çimentolar TS EN 197 standardında 5 ana başlık altında gruplandırılmıştır.

- CEM I Portland Çimentosu
- CEM II Portland-Kompoze Çimento
- CEM III Yüksek Fırın Cürufu Çimento
- CEM IV Puzolanlı Çimento
- CEM V Kompoze Çimento

Yukarıda adı geçen çimento tiplerinin bileşimleri Çizelge 3.3'te verilmektedir.

Çizelge 3.3. Çimento tiplerine ait bileşim değerleri (TS EN 197)

Ana Tipler	27 ürüne ait işaret (Genel Çimento Tipleri)		Bileşim (kütlege ^{a)} % olarak)											Minör ilave Bileşen
			Ana Bileşenler											
			Klinker K	Yüksek Fırın Curufu S	Silis Dumanı D ^{b)}	Puzolan Doğal P Doğal Kalsine Edilmiş Q		Uçucu Kül Silissi V Kalkersi W		Pişmiş Şist T	Kalker L LL			
CEM I	Portland Çimento	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Portland-Curufllu Çimento	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94	-	6 - 10	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21- 35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5	
	Portland-Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Portland-Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5	
	Portland-Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 -35	0-5	
	Portland-Kompoze Çimento ^{c)}	CEM II/A-M	80-94	←----- 6 – 20 -----→										0-5
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21 - 35 -----→										0-5
	CEM III	Yüksek fırın Curufllu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Puzolanik Çimento ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11 - 35 -----→					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36 - 55 -----→					-	-	-	0-5	
CEM V	Kompoze Çimento ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18 - 30 -----→			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←----- 31 - 50 -----→			-	-	-	-	0-5	
a Çizelgedeki değerler ana ve minör ilâve bileşenlerin toplamı ile ilgilidir. b Silis dumanının oranı % 10'la sınırlanmıştır. c Portland Kompoze çimento CEM II/A-M ve CEM II/B-M'de, Puzolanik Çimento CEM IV/A ve CEM IV/B'de, Kompoze Çimento CEM V/A ve CEM V/B'de klinkerin yanındaki diğer ana bileşenler çimentoya ait işaretle beyan edilmelidir (Madde 8).														

Üretilen çimentonun kalitesinin en önemli göstergesi istenilen standart dayanım değerinin sağlanabilmesidir. Çimentonun standart dayanım değeri TS EN 196'ya göre tayin edilen 28 günlük basınç dayanımıdır. 32,5, 42,5 ve 52,5 olmak üzere 3 farklı dayanım sınıfı belirlenmiştir. Yine TS EN 196'ya göre tayin edilen 2 ve 7 günlük basınç dayanımları çimentonun erken dayanımı olarak nitelendirilmektedir. Erken dayanım ise kendi içerisinde normal erken dayanım sınıfı (N) ve yüksek erken dayanım sınıfı (R) olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Çizelge 3.4'de farklı dayanım sınıflarına ait mekanik ve fiziksel özellikler verilmektedir.

Çizelge 3.4. Dayanım sınıflarına ait mekanik ve fiziksel özellikler (TS EN 197)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)				Priz başlama süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				

3.1.1.1. Granüle yüksek fırın cürufu

Granüle yüksek fırın cürufu, demir cevheri yüksek fırında ergitilip arıtılırken elde edilen uygun bileşimdeki ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilmektedir, kütlece en az 2/3 oranında camsı cüruf ihtiva eder ve uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir.

Granüle yüksek fırın cürufunun kütlece en az 2/3'ü, kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO_2) toplamından ibaret olmalıdır. Geri kalan kısmı az miktarda diğer bileşiklerle birlikte alüminyum oksit (Al_2O_3) ihtiva eder. Kütlece $(\text{CaO}+\text{MgO}) / (\text{SiO}_2)$ oranı 1,0'dan fazla olmalıdır (TS EN 197).

3.1.1.2. Puzolanik maddeler

Puzolanik maddeler, silissi veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir.

Puzolanik maddeler su ile karıştırıldığında kendi kendine sertleşmezler fakat, ince öğütüldüğünde ve suyun mevcudiyetinde normal çevre sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikler oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Bu bileşikler, hidrolik maddelerin sertleşmesinde oluşan bileşiklerle benzerdir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranı ihmal edilebilir. Reaktif silisyum dioksit miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır (TS EN 197).

3.1.1.3. Uçucu kül

Uçucu kül, pulverize kömür yakılan fırınlardan atılan baca gazındaki toz taneciklerinin elektrostatik veya mekanik olarak çöktürülmesi ile elde edilir. Uçucu küller silissi veya kalkersi yapıda olabilir. Silissi uçucu külün puzolanik özellikleri vardır. Kalkersi uçucu külün ise hidrolik özelliklerine ilaveten puzolanik özellikleri olabilir.

Silissi Uçucu Kül

Silissi uçucu kül çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden ibaret ince bir toz olup, esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalan kısmı ise demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder (TS EN 197).

Kalkersi Uçucu Kül

Kalkersi uçucu kül, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşur. Geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler ihtiva eder (TS EN 197).

3.1.1.4. Pişmiş Şist

Pişmiş şist, özel bir fırında yaklaşık 800°C sıcaklıkta üretilir. Doğal maddenin bileşimi ve üretim prosesi nedeniyle pişmiş şist esas olarak dikalsiyum silikat ve monokalsiyum alüminat olmak üzere klinker fazlarını ihtiva eder. Aynı zamanda az miktarda serbest kalsiyum oksit ve kalsiyum sülfatın yanında, özellikle silisyum dioksit olmak üzere daha yüksek oranlarda, puzolanik reaksiyona giren oksitleri ihtiva eder. Buna göre ince öğütülmüş pişmiş şist, puzolanik özelliklere ilave olarak, portland çimentosu gibi belirgin hidrolik özellikler de gösterir (TS EN 197).

3.1.1.5. Kalker (Kireç taşı)

Kalkerin, kalsiyum oksit içeriğinden hesaplanan kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeriği kütlege en az %75 olmalıdır. Kil içeriği ise 1,20 g/100 g'ı geçmemelidir ve toplam organik karbon içeriği L tipinde kütlege %0,5'i, LL tipinde ise %0,2'yi aşmamalıdır (TS EN 197).

3.1.1.6. Silis dumanı (Silika füme)

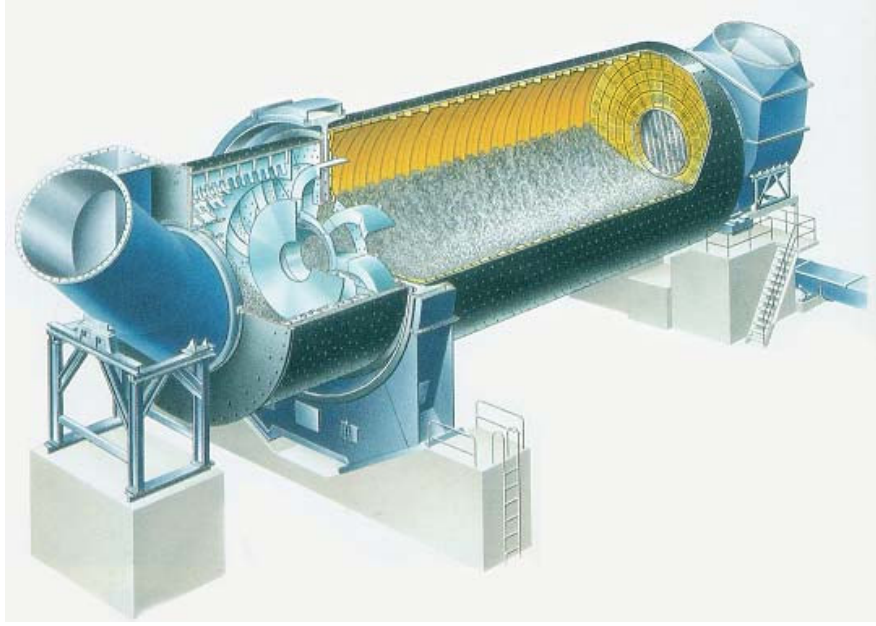
Silis dumanı, silisyum ve ferrosilisyum alaşımları üretimi sırasında yüksek saflıktaki kuvarsın kömürle birlikte elektrik ark fırınlarında indirgenmesinden oluşur ve kütlege en az %85 amorf silisyum dioksit içeren çok ince küresel taneciklerden ibarettir (TS EN 197).

3.2. Çimento Üretiminde Öğütme İşlemi

Çimento endüstrisinde öğütme hammadde ve klinker için ayrı ayrı yapılmaktadır. Öğütmenin en önemli amacı kullanım için istenilen özelliklere uygun ürünün elde edilmesi ve istenilen özgül yüzey ile dayanımı karşılayacak malzemeyi üretmektir (Gouda, 1981).

3.2.1. Hammadde öğütme

Döner fırına beslenen hammadde bileşenlerinin belirli bir tane boyutunun altında olması gerekmektedir. Fırına beslenen malzeme iri olduğunda, fırında birikme meydana gelmekte ve bileşenler arasındaki kimyasal reaksiyonlar tam olarak gerçekleşemediği için istenen özelliklerde fırın çıkışı ürün elde edilememektedir. Hammaddenin istenen inceliğe öğütülmesiyle döner fırın beslemesinin harmanlanması ve sinterlenmesi daha kolay olmaktadır. Hammaddenin öğütülmesi, malzemenin döner fırına palp olarak beslendiği yaş sistem veya kuru olarak beslendiği kuru sistemle gerçekleştirilmektedir. Kuru sistem hammadde değirmeninin genel görünümü Şekil 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Hammade öğütme değirmeninin genel görünümü

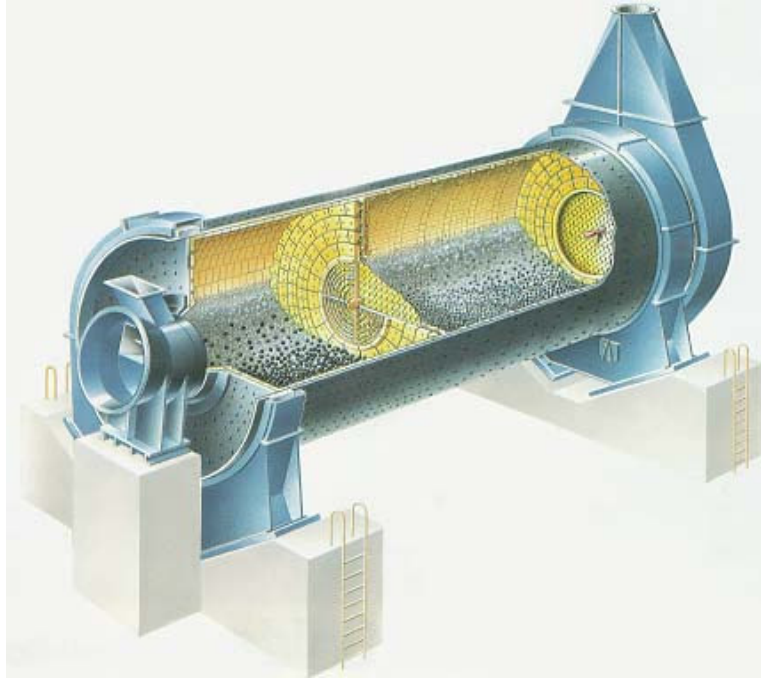
3.2.2. Çimento öğütme

Çimento öğütme genellikle farklı öğütme ortamları içeren kamaralı tüp değirmenlerde yapılmaktadır. Öğütücü ortam olarak genellikle bilya kullanılmakla birlikte son kamarada silpebs de kullanılmaktadır.

Tüp değirmen dışındaki öğütme sistemlerinin kullanımı da son yıllarda oldukça artmıştır. Çimento üretim maliyetinin %30-40 kadarının öğütme enerjisi maliyeti olduğu bilinmektedir (Fujimoto, 1993). Bu bağlamda artan enerji fiyatlarının da etkisiyle özellikle 70'li yıllardan bu yana enerji tasarrufu sağlayan yeni öğütme sistemleri geliştirme yönünde önemli çabalar vardır. Bu sayede, konvansiyonel yöntemler olarak tanımlanan bilyalı ve dik değirmenlerde yapılan gelişmelere ek olarak, yüksek basınçlı merdaneli presler, düşey milli darbeli kırıcılar, Horomill geliştirilerek enerji tüketimlerinde önemli tasarrufların sağlanması mümkün olmuştur (Knobloch, 1986; William and Brugan, 1989; Stoiber et al., 1994; Cordonnier, 1994).

3.2.2.1. Bilyalı / Tüp değirmenler

Çelik bilyaların öğütücü ortam olarak kullanıldığı değirmenler bilyalı değirmen olarak adlandırılmaktadır. Bilyalı değirmenlerin boy-çap oranı 1,5 ile 1 arasında değişmektedir. Boy-çap oranı 3 ile 5 arasında değişen değirmenler tüp değirmen olarak nitelendirilmektedir. Şekil 3.3'te kamaralı bir tüp değirmenin genel görünümü verilmektedir.

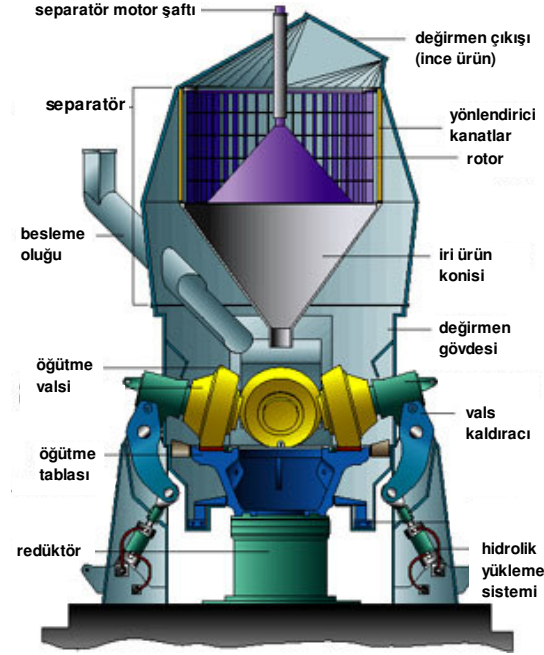


Şekil 3.3. Çimento öğütmede kullanılan kamaralı bir değirmenin kesit görünümü

3.2.2.2. Yüksek basınçlı değirmenler

Dik değirmenler

Dik değirmenlerin öğütme prensipleri temel olarak iki yüzey arasında malzemenin sıkıştırılarak ezilmesi prensibine dayanmaktadır. Sistemde bir besleyici, öğütme tablası, sabit pozisyonlu valsler, hava enjeksiyon halkaları ve separatör besleyici birimleri yer almaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Dik Değirmen

Malzeme besleyici vasıtasıyla öğütme tablasına beslendikten sonra merkezkaç kuvveti etkisiyle tabla kenarına doğru hareket etmekte ve valsler ve tabla arasından geçerken valslerin uyguladığı ezme kuvvetinin etkisiyle ezilerek öğütülmektedir. Öğütülen malzeme, tabla etrafında bulunan hava enjeksiyon halkalarından üflenen sıcak gazların etkisiyle yukarı yönde separatöre doğru taşınmaktadır. Separatörde sınıflandırılan malzemenin irisi öğütme ortamına geri dönerken, separatör incesi değirmenden son ürün olarak alınmaktadır. Bu tip değirmenlerde, kurutma ve öğütme aynı üniteye yapılmakta olup, %22'ye kadar nem içeren malzemelerin öğütülebilmesi mümkün olmaktadır (Brugan, 1992).

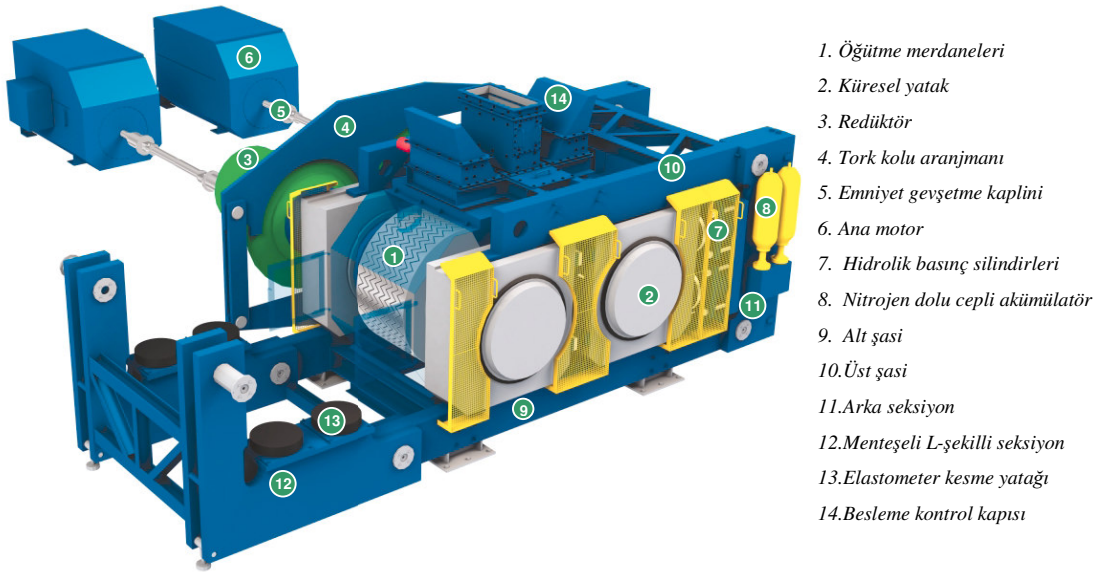
Dik değirmenler genellikle hammadde öğütme sistemlerinde kullanılmaktadır, ancak klinker öğütme sistemlerinde de kullanıldığı bilinmektedir (Öner, 1996).

Yüksek basınçlı merdaneli presler

Ezme kuvvetinin uygulandığı sistemlerden birisi olan yüksek basınçlı merdaneli presler Schoenert tarafından geliştirilerek endüstriyel uygulama alanı bulmuştur (Schoenert and Knoblach, 1984). Öğütme sistemi, bir besleyici ile birlikte yatay eksen etrafında dönmekte olan merdaneler ve separatörden oluşmaktadır.

Öğütme sırasında merdaneler tarafından 50 Mpa'dan daha yüksek basınçlar uygulanarak öğütme sağlanmaktadır. Bu kadar yüksek basınç altında öğütülen malzeme presi yassı bir kek olarak terk ettiğinden, bunun sınıflandırma ünitesine girmeden önce bir dağıtma ünitesinde dağıtılmas gerekmektedir. Geliştirilen bazı sınıflandırıcılara (V separatör) bu kekler doğrudan beslenebilmekte ve sınıflandırıcı tarafından dağıtılabilmektedir.

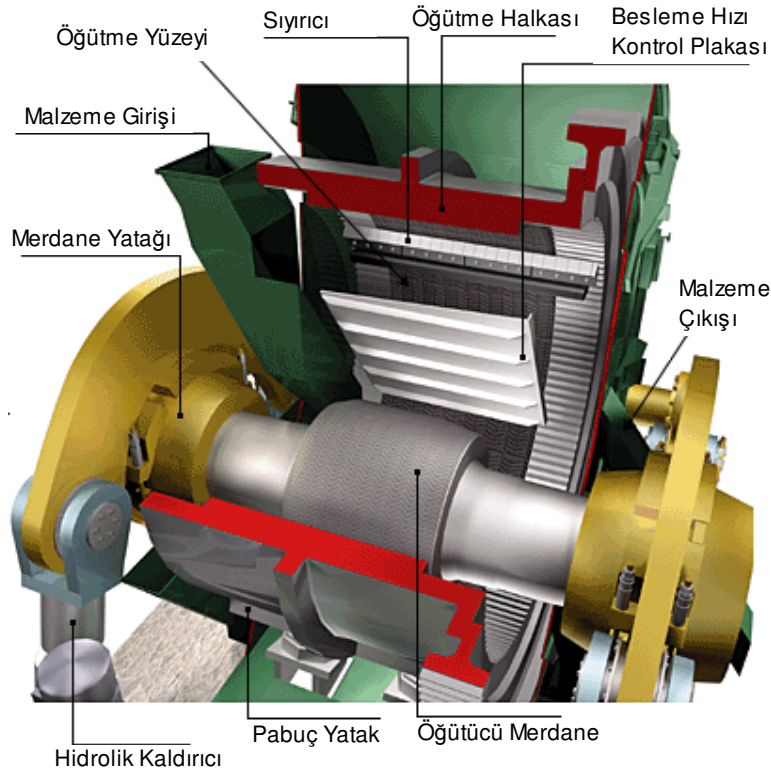
Şekil 3.5'te modern bir yüksek basınçlı merdaneli pres şekli verilmektedir.



Şekil 3.5. Yüksek Basınçlı Merdaneli Pres

Horomill

Yüksek basınçlı işlemlerde, enerji verimliliği, kaliteli ürün ve mekanik güvenilirlik gibi etmenlerden dolayı elde edilen başarı nedeniyle özellikle aşınma problemlerinin asgariye indirgenebileceği teknikler araştırılmaktadır. Bunun sonucunda halka ve merdane prensibine dayalı bir değirmen olan Horomill (Şekil 3.6) geliştirilmiştir (Cordonnier, 1994).

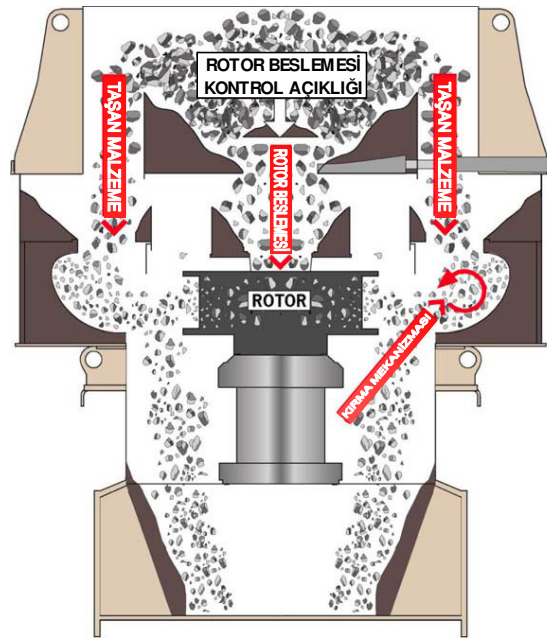


Şekil 3.6. Horomill

Sistemde kritik hızın üzerinde dönen bir öğütme halkası bulunmaktadır. Dönen halkanın her iki tarafında toz sızdırmaz contalarla donatılmış sabit kapaklar bulunmaktadır. Değirmene beslenen malzeme halka ve basınç yüklü merdane arasında ezilerek öğütülmektedir. Merdanenin halka ile aynı yöndeki dönüşü öğütülen malzemenin oluşturduğu sürtünme kuvvetine bağlıdır.

3.2.2.3. Düşey milli darbeli kırıcılar

Besleyici vasıtasıyla sisteme beslenen malzeme yüksek hızda dönmekte olan dağıtma tablasına dökülmektedir. Hızlandırılan taneler kırılma bölgesinde yer alan diğer taneler ile çarpışmaktadırlar. Tanelerde mineral faz sınırları ve mikro çatlaklar gibi zayıf düzlemler boyunca kırılma sağlanmaktadır. Ayrıca sistemde darbenin yanı sıra sürtünme ile aşınma da meydana gelmektedir. Daha çok agrega ve cevher zenginleştirme endüstrilerinde uygulama alanı bulan bu ekipmanın çimento endüstrisinde kullanımı hammadde ve klinkerin ön öğütülmesi şeklinde olmaktadır. Düşey milli darbeli kırıcıların çalışma prensibi Şekil 3.7'de verilmektedir.



Şekil 3.7. Düşey milli darbeli kırıcı çalışma prensibi

3.2.3. Çimento katkılarının öğütülmesi

Katkılı çimento üretiminde, mineral katkıları klinkerle birlikte veya ayrı ayrı öğütülmektedir. Bu farklı öğütme koşulları sonucunda farklı ürünler ortaya çıkmaktadır.

Klinkerin çeşitli katkı malzemeleriyle birlikte öğütülmesi sırasında bileşenlerin tane boyu dağılımını bir diğerinden bağımsız olarak kontrol etmek mümkün olmamaktadır. Öğütülmesi zor olan bileşenler iri boylarda, kolay olan bileşenler ise ince boylarda birikmektedir. Buna ek olarak, öğütülmesi zor olan malzemelerin tane boyu dağılımları öğütme süresince daralmakta, öğütülmesi kolay olan malzemelerin ise genişlemektedir. Öte yandan bileşenlerin ayrı öğütülmeleri sonucunda ise kontrollü koşullar altında farklı tane boyu dağılımlarına sahip ürünlerin ortaya çıkması sağlanmaktadır (Müller-Pfeiffer et al., 2000).

Farklı öğütülebilirlik ve fiziksel özelliklere sahip bileşenler ayrı ayrı öğütüldüğünde özgül enerji tüketimi, birlikte öğütmeye oranla daha düşük olmaktadır.

4. BOYUT KÜÇÜLTMENİN MATEMATİKSEL İFADESİ

4.1. Enerji Boyut Küçültme İlişkileri

Boyut küçültme teorisi, enerji girdisi ile belirli bir besleme boyut dağılımına bağlı olarak oluşacak ürün boyut dağılımını içermektedir. Çeşitli teoriler ortaya atılmıştır fakat hiçbirisi tam anlamıyla faydalı olamamıştır.

Bunun en önemli sebebi, kırma ve öğütme ekipmanlarında, enerji girdisinin çok büyük bir bölümünün ekipman tarafından soğurulması ve toplam enerjinin çok küçük bir kısmının malzeme kırılmasında kullanılmasıdır. Malzemeyi kırmak için gereken enerji ve proseste oluşan yeni yüzey arasında bir ilişki bulunmaktadır. Fakat bu ilişki, yeni yüzey oluşturmak için harcanan enerjinin tek başına tespit edilebilmesi durumunda açıkça ortaya koyulabilir.

Bilyalı değirmenlerde toplam enerji girdisinin %1'den küçük bir bölümü boyut küçültmede kullanılmakta, enerjinin önemli bir kısmı ise ısı ve ses olarak açığa çıkmaktadır (Wills, 1985).

Bir diğer faktör, plastik özelliğe sahip malzemelerin, yeni bir yüzey oluşturmadan enerjiyi tüketerek sadece şekil değiştirmeleridir. Boyut küçültme teorilerinin tamamı malzemenin kırılman olduğunu, bundan dolayı enerjinin esneme veya küçülme işlemlerinde soğurulmadığını kabul etmektedir (Wills, 1985).

Boyut küçültme işlemi ile işlemde harcanan enerjinin tane boyutu ile değişimi konusunda çok çeşitli araştırmalar mevcuttur (Voller, 1983). Enerji ve kırılma arasındaki ilişkinin en genel matematiksel ifadesi aşağıdaki diferansiyel denklem ile verilmektedir (Walker et al., 1937).

$$dE = -C \cdot \left(\frac{dx}{x^{n_d}} \right) \quad (4.1)$$

Burada, E; birim ağırlığı ufalamak için gerekli enerjiyi, x; tane boyutunu, n_d ve C de malzemenin karakteristiğine ve kullanılan ekipmana bağlı sabitleri göstermektedir.

Boyut küçültme işlemleri sırasında harcanan enerji Rittinger, Kick ve Bond tarafından bir dizi teori ile açıklanmaya çalışılmıştır.

Bilinen en eski teori Rittinger (1867) teorisidir. Rittenger'e göre boyut küçültme işlemlerinde harcanan enerji oluşan yeni yüzey alanı ile doğru ve ürün çapı ile ters orantılı olarak değişmektedir.

$$E_R = C_R \cdot \left(\frac{1}{X_p} - \frac{1}{X_f} \right) \quad (4.2)$$

Burada, E_R ; harcanan enerjiyi, C_R ; Rittinger sabitini, X_f ve X_p ; besleme ve ürün tane boyutunu göstermektedir.

Kick (1885), ufalama için gerekli enerjinin, besleme ve ürün tane boyutundan bağımsız ve yalnızca indirgeme oranına bağlı olduğunu belirtmektedir.

$$E_K = C_K \cdot \log \left(\frac{X_f}{X_p} \right) \quad (4.3)$$

Bond (1960) teorisine göre ise bir malzemeyi kırmak için harcanan enerji ürün çapının karekökü ile ters, oluşan çatlak uzunluğu ve yüzey alanının karekökü ile doğru orantılıdır.

$$W = 10 \cdot W_i \cdot \left(\frac{1}{P_{80}^{0.5}} - \frac{1}{F_{80}^{0.5}} \right) \quad (4.4)$$

Eşitlikte yeralan W_i ; iş indeksidir ve malzemenin öğütme ve kırılmaya karşı direncini göstermektedir.

Bu teoriler arasında, ufalama enerjisi ve oluşacak ürünün tane boyutu arasındaki ilişkiyi açıklayan en kullanışlı yaklaşım Bond teorisi olarak görülmektedir. Bu teoriler yasa olarak görülmemekte, kesikli öğütme için deneysel ilişkiler olarak kabul edilmektedir (Marshall, 1966).

Boyut küçültmenin enerjiye bağılı ifade edilmesi doğru bir yaklaşım olarak görülmesine rağmen işlem sırasındaki sürtünme ve ses kayıpları, plastik ve elastik deformasyonlar, kinetik ve potansiyel enerji kayıpları nedeniyle yaklaşımlar genel bir fikir vermekten öteye gidememektedir. Örneğin Bond yaklaşımında sabit bir besleme dağılımının ufalanmasında harcanan enerji elde edilen ürünün %80'inin geçtiği boyuta (P_{80}) bağılı olarak belirlenebilmektedir. Ancak aynı P_{80} değerine sahip pek çok dağılım elde edilmesi mümkündür. Bu da yapılan farklı işler için aynı enerji değerinin hesaplanabileceğinin bir göstergesidir (Bayraktar, 1974).

Bu nedenle, boyut küçültme ekipmanı içinde meydana gelen kırılma olayının fiziksel doğasını ele alan, daha iyi yaklaşımların geliştirilmesi için çalışmalar her zaman sürmüştür. Bu alanda hem deneysel hem de teorik pek çok araştırmalar yapılmıştır (Austin and Rogers, 1985).

Kırılma parametrelerine bağılı olarak ufalama enerjisinin ve boyut dağılımlarının belirlendiği matematiksel modelleme yaklaşımlarında kırılma işlemi malzemenin kırıldıktan sonraki boyut dağılımını gösteren kırılma dağılım fonksiyonu ve kırılma olasılığını ifade eden kırılma hızı parametreleri ile ifade edilmektedir.

4.2. Boyut Küçültmenin Modellenmesi

Bir boyut küçültme işleminden maksimum verimliliğin elde edilebilmesi, uygun ekipmanların seçimi, işletme değişkenlerinin iyi tanımlanması ve işletim sırasında bu değişkenlerdeki değişimin işlem üzerindeki etkisinin doğru belirlenebilmesine bağlıdır. Sistemin tasarım, kontrol ve optimizasyonu, ancak işletme değişkenlerinde veya besleme özelliklerindeki değişimleri güvenilir bir şekilde tanımlayabilecek matematiksel eşitliklerin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir. Çalışma koşullarındaki farklılıklara bağılı olarak her ekipmana ait farklı model yaklaşımları bulunmaktadır.

4.2.1. Temel modeller

Temel modeller, ekipman içerisindeki fiziksel koşullar ile proses çıktısı (ürün) arasındaki ilişkinin tanımlanmasına dayanmaktadır. Pratikte DEM (Discrete Element Method) model yapısı değirmen içerisindeki her bir elementin ayrı ayrı gözlemlenip değerlendirilmesidir.

Bu konuda yapılan çalışmaların sayısı hızla artmaktadır. Bu çalışmaların temeli Utah Comminution Center tarafından yürütülen çalışmalara dayanmaktadır. Bu çalışmalarda değirmen içindeki bilyaların hareketleri tek tek izlenerek modellenmektedir. Mishra and Rajamani (1992) bu yöndeki çalışmalarında bilyalı değirmenin iki boyutlu dilimlenmiş halkalardan oluştuğunu ve bu halkaların eşdeğer olduklarını varsaymaktadır. Bu model yaklaşımı kullanılarak her büyüklükteki bilyanın hareketi belirlenebilmektedir.

$$[M]a + [C]v + [K] = (f) \quad (4.5)$$

Eşitlikte birinci kısım Newton'un ikinci yasasını temsil etmektedir. M, kütleyi a ise ivmeyi tanımlamaktadır. Bu ivmelenme etkisi sertlik (K) ve nemlenmeye (C) bağlı enerjinin soğurulması nedeniyle azalmaktadır. Eşitlikte f ile kuvvet ifade edilmektedir. Hareketin tek bir hat üzerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde zamana bağlı olarak bilya hareketinin analitik çözülmesi mümkün olmaktadır. Değirmen hızına bağlı olarak bilyaların öğütmeye harcadıkları darbe enerjileri doğrudan belirlenebilmektedir.

Radziszewski (1999) değirmen içerisindeki hareketi darbe, aşınma ve küçük hareket zonları olmak üzere üç gruba ayırmış ve yaklaşımda her bir bölge için ayrı darbe enerjisi tanımlamıştır.

Bilya hareketinin modellenmesini takiben bilyalı değirmen içindeki malzeme hareketi ve değirmen içi enerji dağılımı Misra and Cheung (1999) tarafından yapılan bir çalışma ile ortaya koyulmaktadır. Çalışmada, klinkerin değirmen içindeki kırılma davranımı ve değirmenin güç tüketimi incelenmektedir.

4.2.2. Kara kutu modelleri (Black box models)

Kara kutu modelleri, değirmen çıkışı ürün boyut dağılımını, değirmen besleme boyut dağılımı ve değirmen işletme koşullarının bir fonksiyonu olarak tahmin etmektedir:

$$p = F(f, b, m, s, C) \quad (4.6)$$

f : besleme boyut dağılımı

p : ürün boyut dağılımı

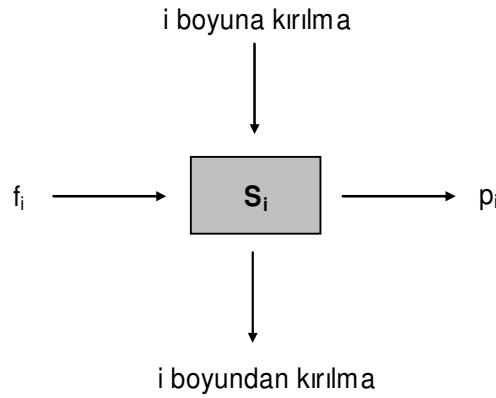
b : normalize edilmiş kırılma matrisi

m : değirmene ait parametre

s : besleme hızını da içeren işletme koşulları

C : benzer ekipmanlardan deneysel olarak elde edilen parametreler

Herhangi bir tane boyu fraksiyonu (i) için değirmen içerisinde veya değirmenin herhangi bir bölgesinde basit bir kütle denkliği; kırılma bölgesine taşınma, kırılma ve dışarı taşınma şeklinde tanımlanabilmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Tek bir tane boyu fraksiyonu için kütle denkliği

Sürekli (continuous) çalışan bir değirmende, denge durumunda giren malzeme miktarı her zaman çıkana eşit olmak zorundadır ve bu kütle denkliği değirmen içerisinde karışma ve kırılma koşulları hakkında varsayımlar yapılarak çözümlenebilmektedir.

Dengede olmayan veya kesikli çalışan değirmenlerde ise tane boyu fraksiyonundaki birikme veya kayıplar için varsayımda bulunularak daha karmaşık çözümler elde edilmektedir. Birçok dinamik çözüm, belirli zaman dilimleri içerisindeki denge durumunu dikkate almaktadır (Napier-Munn et al., 1997).

4.2.2.1. Kütle denkleği modeli (Population balance model)

Kütle denkleği modeli, değirmen içerisinde birim zamanda öğütülen malzeme miktarının sadece o boyut fraksiyonunun değirmen içindeki miktarına bağlı olduğunu varsaymakta ve her boyut fraksiyonu için kırılma (kaybolma) hızını karakterize eden bir hız sabiti k_i tanımlanmaktadır.

$$\text{kırılan malzeme miktarı} = k_i \cdot s_i \quad (4.7)$$

k_i : kırılma hızı

s_i : i boyutunun değirmen içindeki miktarı

Tek tane boyu fraksiyonu etrafında yapılan kütle denkleği kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilmektedir (Şekil 4.1).

$$\begin{array}{ccc} \text{Beslemedeki } i \text{ Boyutunda Malzeme Miktarı} & & \text{Üründeki } i \text{ Boyutunda Malzeme Miktarı} \\ + & = & + \\ i \text{ Boyuna Kırılan Miktar} & & i \text{ Boyundan Kırılan Miktar} \end{array}$$

Modelde, kırılma hızı k_i 'ye ilave olarak, i boyundan iri fraksiyonların (j) kırılmasıyla i boyutuna geçen malzeme miktarını ifade eden kırılma dağılım fonksiyonu b_{ij} tanımlanmaktadır. Kütle denkleğini daha detaylı bir biçimde Eşitlik 4.8'de ifade edilmektedir.

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i \quad (4.8)$$

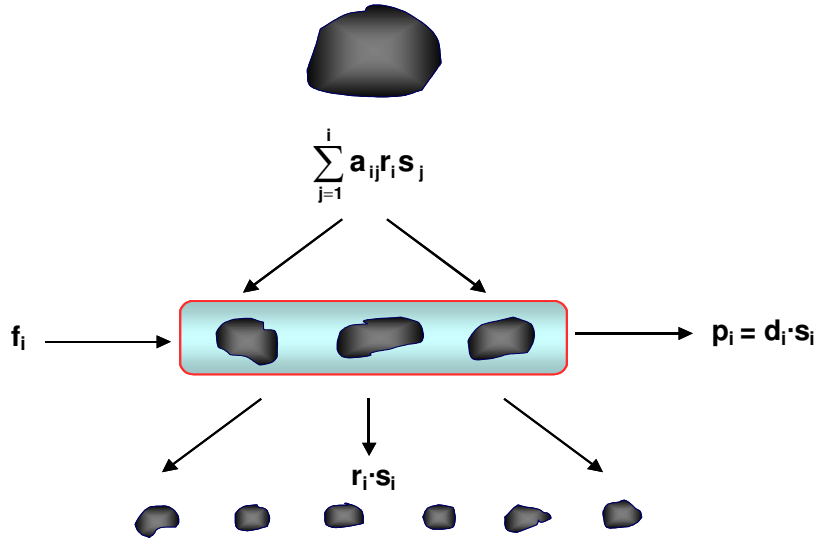
p_i , f_i , s_i ve b_{ij} matrisinin bilinmesi durumunda k_i değerleri en üst boyut aralığından başlanarak tüm fraksiyonlar için hesaplanabilmektedir.

Kütle denkleği modeli değirmen içerisinde gerçekleşen kırılmanın belirli bir durma zamanına bağlı olduğunu kabul etmektedir. Modelin, ortalama durma zamanını ($\sum s_i / \sum f_i$) da kapsayan son şekli Eşitlik 4.9'da verilmektedir (Napier-Munn et al., 1997).

$$p_i = f_i + \lambda \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j - k_i \lambda s_i \quad (4.9)$$

4.2.2.2. Mükemmel karışım modeli

Model, değirmenin mükemmel karışmış tek bir birimden meydana geldiğini kabul etmektedir. Değirmene giren ve çıkan her boyut fraksiyonunun madde denkleği kurulmaktadır. Belirli bir boyut aralığında besleme olarak değirmene giren veya iri boylardan kırılan malzeme değirmenden ürün olarak çıkmakta veya alt boylara ufalanmaktadır. Mükemmel karışım bilyalı değirmen modelinin kırılma mekanizması Şekil 4.2'de sunulmaktadır.



Şekil 4.2. Mükemmel karışım bilyalı değirmen modeli kırılma mekanizması

r_j : i boyutundan daha iri malzemenin (j) kırılma hızı
 s_j : i boyutundan daha iri malzemenin (j) değirmen içindeki miktarı
 a_{ij} : i boyutundan daha iri malzemenin (j) kırılarak i boyutuna geçen miktarı
 r_i : i boyutundaki malzemenin kırılma hızı
 s_i : i boyutundaki malzemenin değirmen içindeki miktarı
 f_i : beslemede bulunan i boyutundaki malzeme miktarı
 d_i : i boyutundaki malzemenin taşınma olasılığı
 p_i : i boyutundaki ürün miktarı

Verilen bir boyut aralığı için tanelerin kırılma ve taşınma hızı birinci dereceden kabul edilmektedir.

Değirmen içerisinde meydana gelen kırılmanın dengede olacağı düşünülerek matematiksel bir eşitlik tanımlanmaktadır.

$$p = f + A \cdot R \cdot S + (I-R) \cdot S \quad (4.10)$$

Bu eşitlikte, R birim zamandaki kırılma hızını ifade eden diagonal matris, A kırılma dağılım fonksiyonuna karşılık gelen matris ve I da birim matrisi (diagonal elemanların 1 ve kalan elemanların 0 olduğu matris) ifade etmektedir.

Belirli bir boyut aralığında bulunan malzemeler iri boylardan kırılmanın ürününü oluşturmaktadır. Bu fiziksel işlem, a_{ij} kırılma dağılım parametresi ile ifade edilebilmekte olup bu üçgen matris j boyutundaki malzemenin kırılma sonucu i boyutuna dağılmasını tanımlamaktadır. $j \geq i$ olduğunda değirmen içinde i boyut fraksiyonundaki malzemenin kütle denkliği Eşitlik 4.11'de verilmektedir.

$$p_i = f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j - r_i s_i \quad (4.11)$$

Mükemmel karışım modeli için, kırılma sonrası oluşacak ürün aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

1. taneler üst boylardan (j boyutu) kırılarak alt boylara (i boyutu) dağılırlar,
2. i boyutuna kırılan bu malzeme tekrar kırılarak daha alt boylara geçer (<i boyutu),

3. beslemeyle birlikte sisteme i boyutundaki malzeme girer,
4. i boyutundaki toplam malzeme belirli bir olasılık dahilinde (d_i) taşınarak ürün elde edilir.

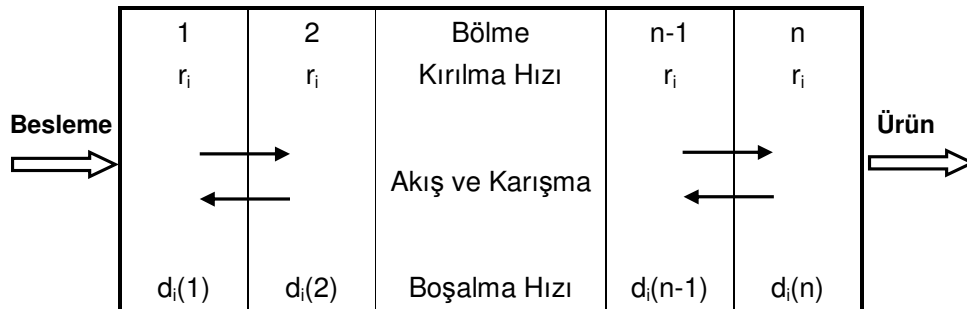
Değirmen içinde yerleşik bulunan malzeme miktarının (S) kestirilebilmesi mümkün olmadığından, Eşitlik 4.11'de, " $p = d \cdot s$ " ifadesinden yararlanılarak S yerine, $\frac{p}{d}$ yazıldığında sadeleşmiş bir ifade elde edilmektedir (Eşitlik 4.12).

$$p_i = f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \frac{r_j}{d_j} - p_i \frac{r_i}{d_i} \quad (4.12)$$

Değirmen içi verilerin çok zor belirlenmesi veya belirlenememesinden ve taşınma hızı fonksiyonu ile değişkenler arasındaki etkileşimi gösteren bir eşitlik olmamasından dolayı, kırılma hızı fonksiyonunu, taşınma hızı fonksiyonu ile birleştirilip tek bir parametre olarak tanımlanmakta ve kırılma hızı parametresi olarak adlandırılmaktadır. Kırılma hızı parametresi birimsiz olup (r/d) ile ifade edilmektedir (Napier-Munn et al., 1997).

4.2.2.3. Çok bölmeli değirmen modelleme yaklaşımı

Whiten (1974) tarafından çok bölmeli değirmen modeli kavramı ortaya atılmıştır. Modelin açıklayıcı bir biçimde gösterimi Şekil 4.3'te verilmektedir (Napier-Munn et al., 1997).



Şekil 4.3. Çok bölmeli değirmen modelleme yaklaşımının şekilsel gösterimi

Modelde değirmenin mükemmel karışan pek çok değirmenden meydana geldiği ve her bir bölme ürününün diğer bölmenin beslemesi olduğu kabul edilmektedir. Her bölme arasında, geçiş bölgesinde, karışmanın meydana geldiği düşünülmektedir (Lynch et al.,1967).

Çok bölmeli değirmen yaklaşımında dört temel model parametresi bulunmaktadır. Bunlar;

- Özgül kırılma hızı fonksiyonu, r_i , (bütün bölmelerde sabit kaldığı düşünülmektedir)
- İri fraksiyonlar (+2 mm) için özgül taşınma hızı fonksiyonu, d_i
- Karışma parametresi, H
- Kırılma dağılım fonksiyonu, b_{ij}

Modelde m'inci bölme için i fraksiyonu ürünü aşağıdaki eşitlikten belirlenebilmektedir.

$$p_{i(m)} = k_m d_{i(m)} S_{i(m)} = f_{i(m)} - r_i S_{i(m)} - \sum_{k=1}^i b_{ik} r_k S_{k(m)} \quad (4.13)$$

k_m : boyutsuz bir sabit

$d_{i(m)}$: m. bölmedeki i. fraksiyonun özgül taşınma fonksiyonu

$f_{i(m)}$: m. bölmeye beslenen i. fraksiyon miktarı

m+1'inci bölmedeki karışıma bağlı olarak m. bölmedeki i boyutundaki malzemenin net karışma akış hızı;

$$M_{i(m)} = H d_{i(m)} (S_{i(m+1)} - S_{i(m)}) \quad (4.14)$$

Modelde m'inci fraksiyondaki özgül kırılma hızı boyutsuz bir parametre (k_m) ile ölçeklendirilmektedir.

$$d_{i(m)} = k_m d_{i(m)}^* \quad (4.15)$$

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

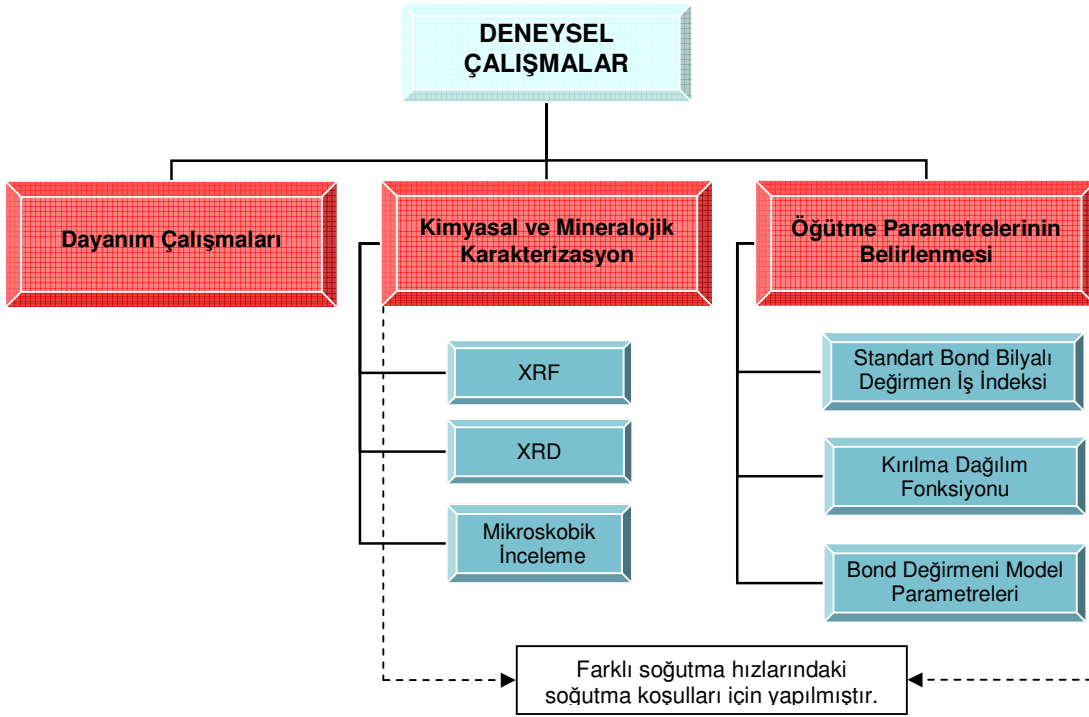
Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. çelik üretim prosesi artığı olan çelikhane cüruflarının çimento üretiminde katkı olarak kullanılabilmesi ve farklı soğutma hızlarına göre çelikhane cüruflarının öğütme karakteristiğinin belirlenebilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca hali hazırda çimento endüstrisinde kullanılmakta olan yüksek fırın cürufu da karşılaştırma yapılmak amacıyla deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

Bu amaçlar doğrultusunda, deneysel çalışmalar iki kısımda ele alınarak; birinci bölümde çelikhane cürufu, yüksek fırın cürufu ve Portland çimentosu kullanılarak dayanım testleri yapılmıştır, ikinci aşamada ise çelikhane cüruflarının öğütme parametrelerinin karakterizasyonu çalışılmıştır. Ancak proses gereği tesiste farklı hızlarda soğutma işlemi yapılması istenmektedir. Farklı soğutma hızlarının malzemenin yapısı ve bunun da öğütme karakteristiği üzerine etkisinin incelenebilmesi amacıyla mineralojik ve kimyasal karakterizasyon yapılmıştır ve kırılma parametreleri de belirlenmiştir.

Çelikhane cüruflarının soğutulmasına ilişkin, tesiste yürütülen soğutma çalışmaları 4 ana kategoride toplamak mümkündür. Bunlar;

- Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufu – ergimiş haldeki çelikhane cürufu bir sahaya dökülmüştür ve kendi halinde soğumuştur
- Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufu – ergimiş haldeki çelikhane cürufu bir sahaya döküldükten sonra yüzeyine su püskürtülerek soğutulmuştur
- Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufu – hızlı soğuyan çelikhane cürufuna oranla daha az miktarda su püskürtülerek soğutulmuştur
- Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufu – ergimiş haldeki çelikhane cürufu bir sahaya dökülmüş ve cüruf kendi halinde soğurken belirli aralıklarla karıştırılmıştır

Deneysel çalışmaları gösteren bir iş akım şeması aşağıda sunulmaktadır.



5.1. Çimento Dayanım Testleri

Çimento dayanım testleri kapsamında; farklı inceliklere öğütülerek hazırlanan yavaş soğuyan çelikhane ve granüle yüksek fırın cürufu numuneleri, değişik oranlarda CEM-I 42,5 R tipi çimentoya katılarak farklı çimento örnekleri hazırlanmış olup, bu örneklerin TS EN 196 standardına uygun olarak basma dayanımı değerleri ölçülmüştür.

Metodoloji

Testler standart ekipmanlara sahip bir çimento beton laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Testlerde yüksek fırın cürufu ve yavaş soğuyan çelikhane cürufu numuneleri ile CEM-I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır.

Karşılaştırma amacıyla, her iki cüruf tipinden de 3000, 4000 ve 5000 Blaine'lik numuneler hazırlanması hedeflenmiştir, fakat çelikhane cürufu numunesi 5000 Blaine inceliğine öğütülememiştir. Ayrıca her bir cüruf tipi için 3000 ve 4000 Blaine incelikleri karıştırılarak 3500 Blaine inceliğe sahip numuneler elde edilmiştir.

Testlerde kullanılmak üzere hazırlanan karışımların miktarı ve bileşenlere ait incelik ve ağırlık değerleri Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1. Karışım miktarları ve cüruf incelikleri

Numune Adı	Ağırlık (g)				Cüruf İnceliği (Blaine)
	CEM-I 42,5 R	Çelikhane Cürufu	Yüksek Fırın Cürufu	Toplam	
BFS-1	1571,4	0,0	428,6	2000,0	3000
BFS-2	1571,4	0,0	428,6	2000,0	3500
BFS-3	1571,4	0,0	428,6	2000,0	4000
BFS-4	1571,4	0,0	428,6	2000,0	5000
SFS-1	1571,4	428,6	0,0	2000,0	3000
SFS-2	1571,4	428,6	0,0	2000,0	3500
SFS-3	1571,4	428,6	0,0	2000,0	4000
M-2a	1571,4	100,0	328,6	2000,0	3500
M-2b	1571,4	200,0	228,6	2000,0	3500
M-2c	1571,4	300,0	128,6	2000,0	3500
Toplam	6285,6	1885,8	2400,2		

Ayrıca numunelerden örnekler hazırlanarak kimyasal analizleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında hazırlanan çimento örneklerinin karışım oranları ile bu örneklerle ait incelik ve yoğunluk değerleri Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Hazırlanan çimento örneklerinin karışım oranları ile incelik ve yoğunluk değerleri

	% Ağırlık								40 µm eleküstü (%)	90 µm eleküstü (%)	İncelik (Blaine)	Yoğunluk (g/cm³)
	CEM-I 42,5 R	ÇELİKHANE CÜRUFU			GYFC							
		3000 Blaine	3500 Blaine	4000 Blaine	3000 Blaine	3500 Blaine	4000 Blaine	5000 Blaine				
Kontrol Çimentosu	100,00	-	-	-	-	-	-	-	8,6	0,5	3591	3,14
BFS-1	78,57	-	-	-	21,43	-	-	-	9,7	0,4	3503	3,10
BFS-2	78,57	-	-	-	-	21,43	-	-	8,2	0,5	3562	3,09
BFS-3	78,57	-	-	-	-	-	21,43	-	8,2	0,4	3692	3,10
BFS-4	78,57	-	-	-	-	-	-	21,43	7,7	0,4	3912	3,10
SFS-1	78,57	21,43	-	-	-	-	-	-	11,8	0,7	3531	3,27
SFS-2	78,57	-	21,43	-	-	-	-	-	9,7	0,5	3577	3,27
SFS-3	78,57	-	-	21,43	-	-	-	-	8,0	0,4	3718	3,27
M-2a	78,57	-	5,00	-	-	16,43	-	-	9,0	0,4	3650	3,14
M-2b	78,57	-	10,00	-	-	11,43	-	-	8,7	0,5	3601	3,17
M-2c	78,57	-	15,00	-	-	6,43	-	-	9,5	0,5	3621	3,21

5.2. Kimyasal ve Mineralojik Analiz

X-ışını floresans (XRF) ve kırınımı (XRD) yöntemleriyle cürufların kimyasal ve mineralojik bileşimleri belirlenmiştir. Ayrıca cüruf numunelerinden parlak kesitler hazırlanarak mikroskop altında incelenmiştir.

5.3. Öğütme ve Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi

5.3.1. Standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi değerinin belirlenmesi

Sonsuz büyüklükteki bir malzemenin %80'inin 100 mikron altına geçmesi için gerekli enerjinin bir göstergesi olan Bond iş indeksi, aynı zamanda malzemenin kırılmaya ve öğütülmeye karşı olan direncini göstermektedir. Bond iş indeksi değerinin yüksek olması, malzemenin öğütülmeye karşı direncinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Bu çalışma kapsamında, klinker ile dört farklı soğutma hızında soğutulmuş çelikhane cürufları ve yüksek fırın cürufu numuneleri üzerinde, TS 7700 standardına uygun olarak, standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi testi yapılmıştır.

Cüruf numuneleri %0, %10, %15, %20, %35 ve %100 katkı oranlarında klinker ile karıştırılarak öğütülebilirlik testi yapılmıştır. Test sırasında 90 µm'luk test eleği kullanılmıştır.

Ayrıca laboratuvar ölçekli Bond bilyalı değirmenin model parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla, standart Bond iş indeksi testi sırasında, sistemin dengede olduğu son periyoda ait değirmen giriş ve çıkış tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları, iş indeksleri ve kırılma dağılım fonksiyonları kullanılarak, farklı katkı oranlarındaki besleme numuneleri için Bond değirmeni model parametreleri hesaplanmıştır.

5.3.2. Kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi

Boyut küçültme ekipmanlarının modellenebilmesi için, malzemeye özgü kırılma dağılım fonksiyonunun belirlenmesi gerektiğinden bu çalışma kapsamında, dört farklı soğutma hızında soğutulmuş çelikhane cüruflarından hazırlanan tek tane boyu fraksiyonları üzerinde ağırlık düşürme testi yapılarak kırılma dağılım fonksiyonları belirlenmiştir.

Ağırlık düşürme test yönteminde temel prensip, çelik örs üzerine yerleştirilen tane üzerine ağırlığın belirli bir yükseklikten serbest düşme hareketi yapacak şekilde bırakılmasıyla kırılmasıdır. Malzemelerin kırılma davranımlarının karakterizasyonu amacıyla kullanılan düzeneğin şematik gösterimi Şekil 5.1'de sunulmaktadır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1. Çimento Dayanım Testleri

Hazırlanan çimento örnekleriyle dökülen harçlar üzerinde yapılan çimento dayanım testleri sonrasında elde edilen veriler ve karışımlara ait kimyasal analiz sonuçları sırasıyla Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.1. Çimentolara ait basma dayanımı, priz süresi ve hacim genişmesi değerleri

	Basma Dayanımı (MPa)			Priz Süresi (dakika)		Hacim Genleşmesi (mm)
	2 gün	7 gün	28 gün	Başlangıç	Bitiş	
Kontrol Çimentosu	28,2	39,8	52,4	210	270	0
BFS-1	19,0	33,3	47,1	240	290	0
BFS-2	19,8	32,5	47,4	230	280	1
BFS-3	19,7	34,6	50,1	220	270	0
BFS-4	20,1	36,2	52,8	210	270	0
SFS-1	17,1	34,6	48,6	320	450	1
SFS-2	17,8	33,0	47,7	290	390	2
SFS-3	16,8	33,2	49,4	280	350	0
M-2a	20,8	33,7	47,9	250	300	1
M-2b	20,3	33,4	47,8	280	330	1
M-2c	18,8	35,7	49,4	270	310	1

Çizelge 6.2. Çimento numunelerine ait kimyasal analiz sonuçları

	Bileşen (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	K.K.
Kontrol Çimentosu	20,16	4,93	3,31	64,65	1,42	0,86	0,25	3,21	3,21
BFS-1	25,09	6,41	2,78	58,58	3,44	0,93	0,20	2,64	2,52
BFS-2	24,45	6,21	2,85	57,69	3,31	0,90	0,24	2,94	2,22
BFS-3	24,65	6,33	2,78	57,92	3,31	0,91	0,20	2,64	2,52
BFS-4	24,92	6,52	2,81	57,40	3,42	0,92	0,21	2,71	2,52
SFS-1	18,36	4,20	9,18	60,96	1,56	0,68	0,20	2,78	2,52
SFS-2	18,23	4,17	10,03	61,42	1,63	0,68	0,15	2,62	1,92
SFS-3	18,29	4,21	9,82	60,94	1,59	0,68	0,20	2,63	2,52
M-2a	24,52	6,23	4,17	56,53	3,52	0,89	0,42	2,89	2,16
M-2b	22,46	5,51	6,46	63,13	2,67	0,84	0,30	2,93	2,07
M-2c	20,17	4,82	7,82	60,04	2,09	0,75	0,20	2,63	2,52

6.2. Kimyasal ve Mineralojik Bileşim

Numunelere ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.3'te verilmektedir.

Çizelge 6.3. Klinker ve cüruf numunelerinin kimyasal kompozisyonu

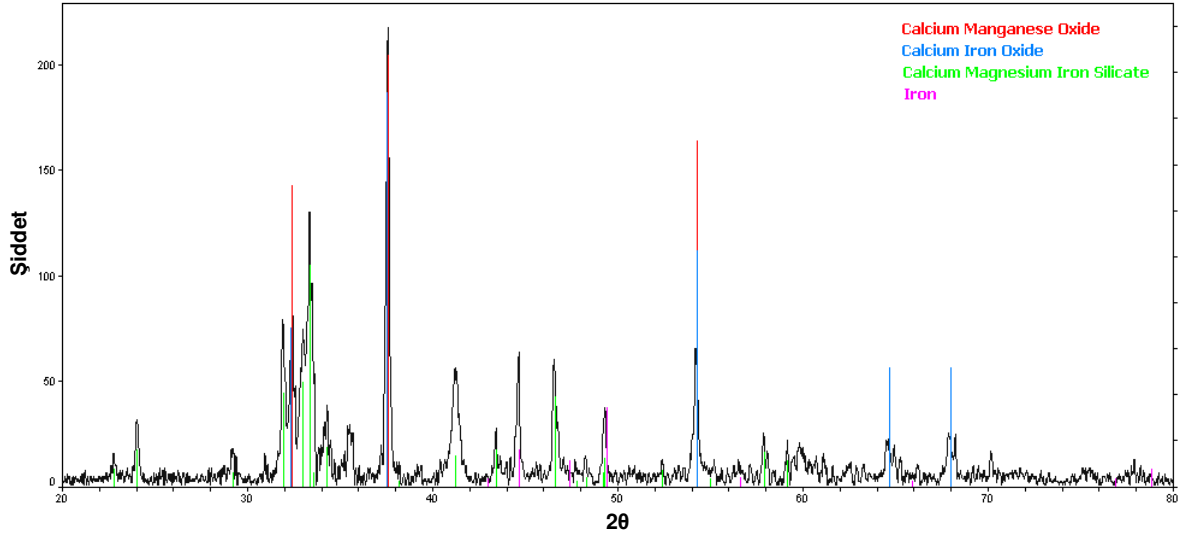
%						
Bileşen	Çelikhane Cürufu				GYFC	Klinker
	Kendiliğinden Soğuyan	Yavaş Soğuyan	Hızlı Soğuyan	Karıştırılarak Soğutulan		
Toplam Fe	22,48	21,83	21,83	15,14	0,93	2,65
SiO ₂	6,39	11,05	8,88	11,12	33,98	21,42
Al ₂ O ₃	0,85	1,33	1,11	1,72	13,03	5,06
CaO	53,58	49,31	48,80	55,72	29,87	62,88
MnO	4,05	4,70	5,81	4,97	2,37	0,03
MgO	0,93	2,87	2,53	1,46	12,18	2,61
P ₂ O ₅	1,21	1,07	1,53	1,30	< 0,01	0,06
S	0,09	0,26	0,08	0,04	0,65	0,44
Na ₂ O	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,37	0,24
K ₂ O	< 0,01	0,01	0,01	0,01	0,84	0,90
TiO ₂	0,04	0,37	0,30	0,40	0,90	0,10

Çelikhane cüruflarının x-ışını kırınımı desenleri Şekil 6.1-6.4'de verilmektedir.

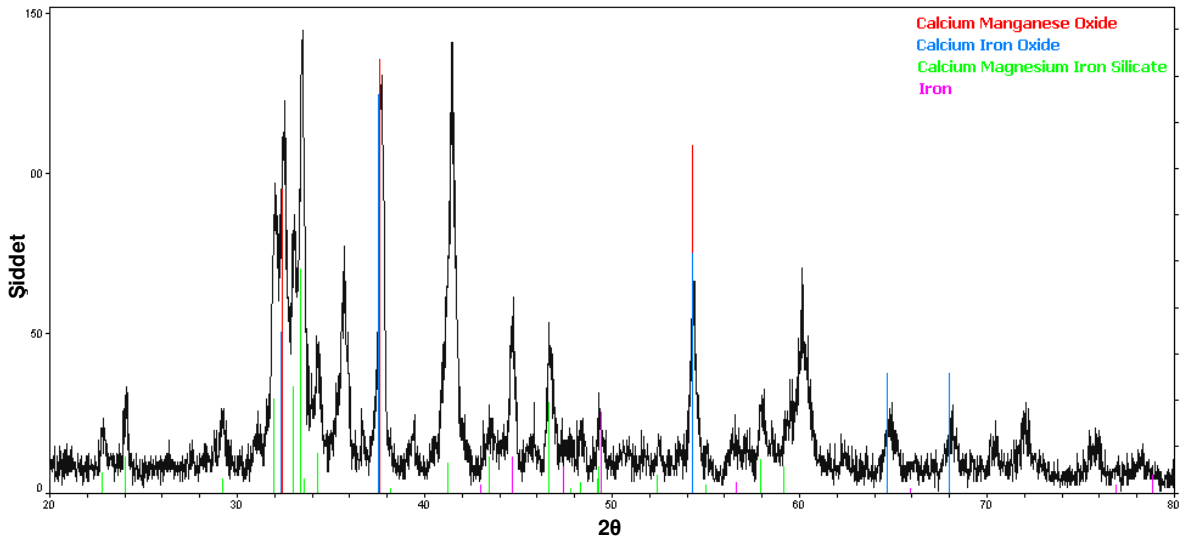
Numuneler;

Kalsiyum Mangan Oksit
Kalsiyum Demir Oksit
Kalsiyum Magnezyum Demir Silikat
Kalsiyum Silikat (Larnit)
Demir

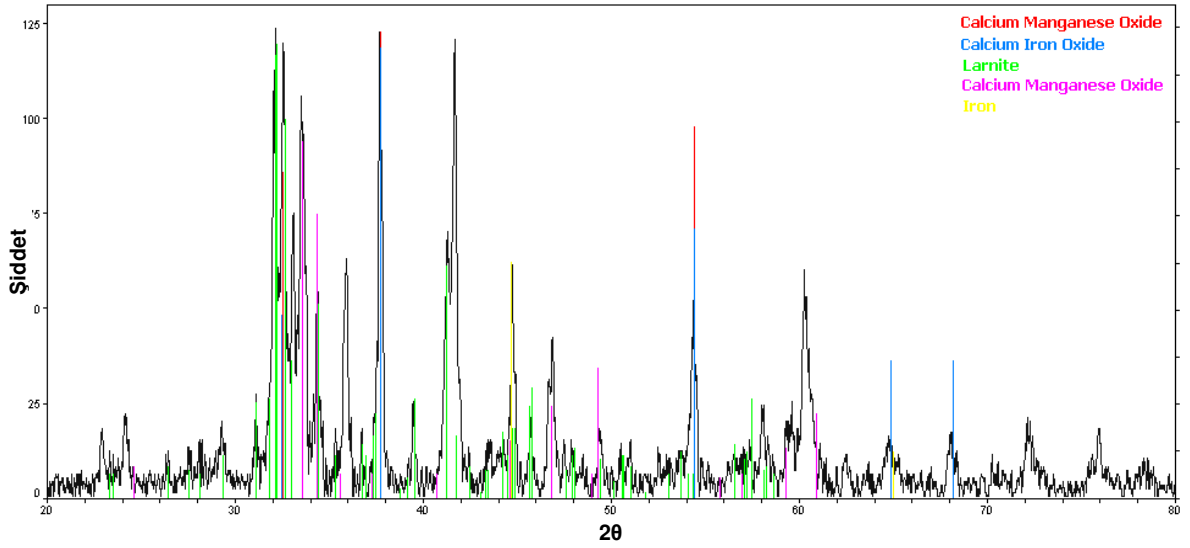
fazlarını içermektedir.



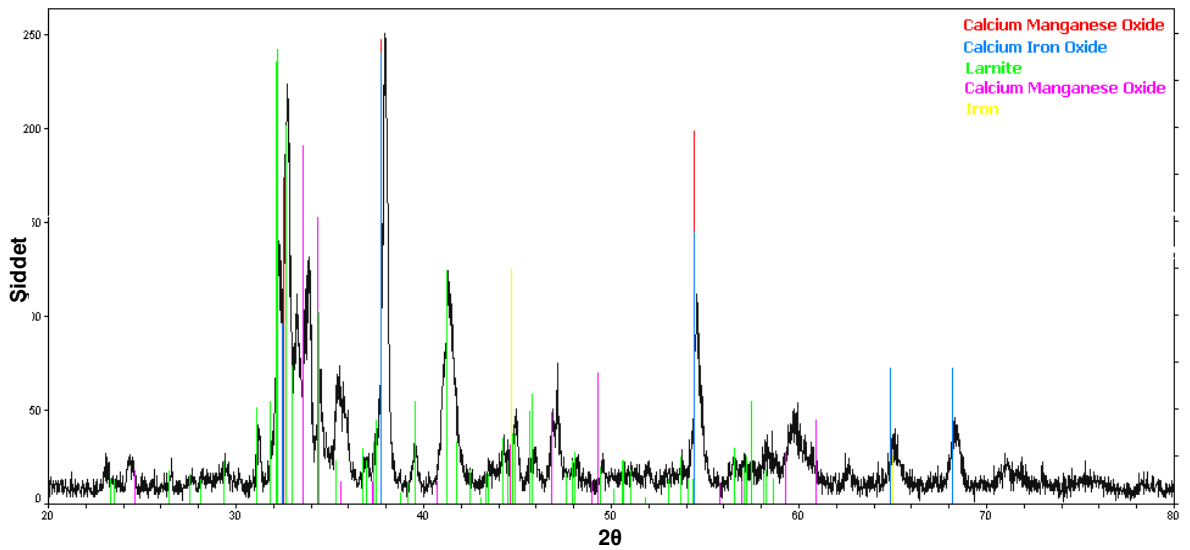
Şekil 6.1. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni



Şekil 6.2. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni



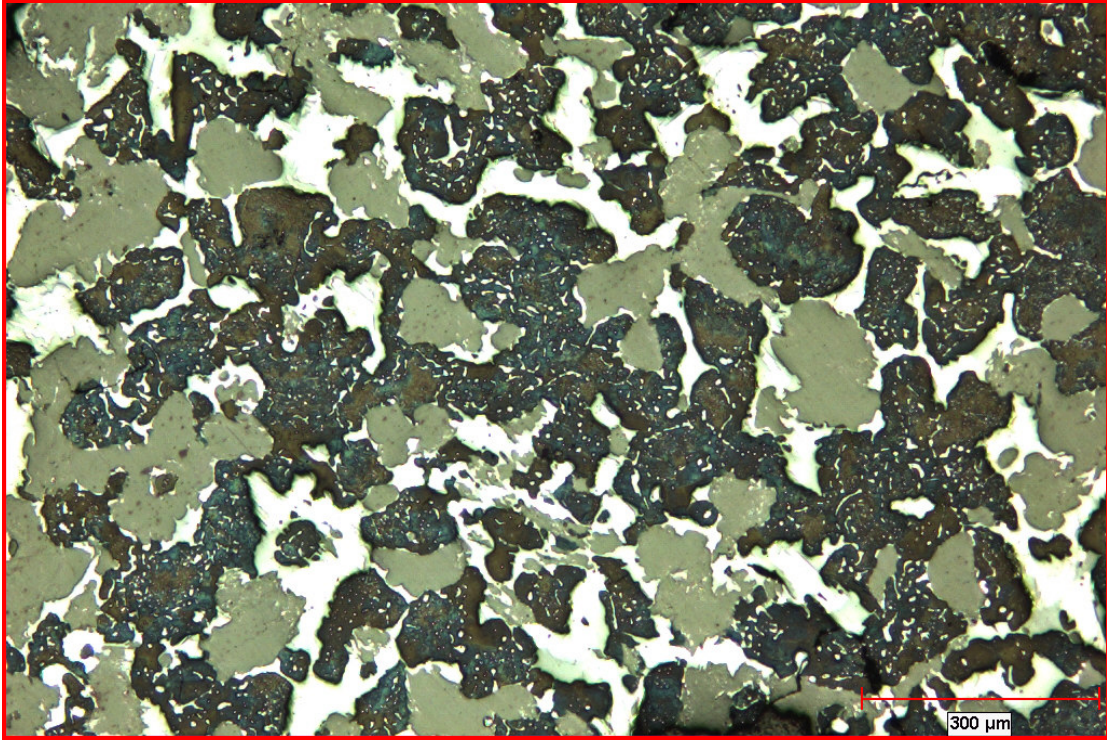
Şekil 6.3. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni



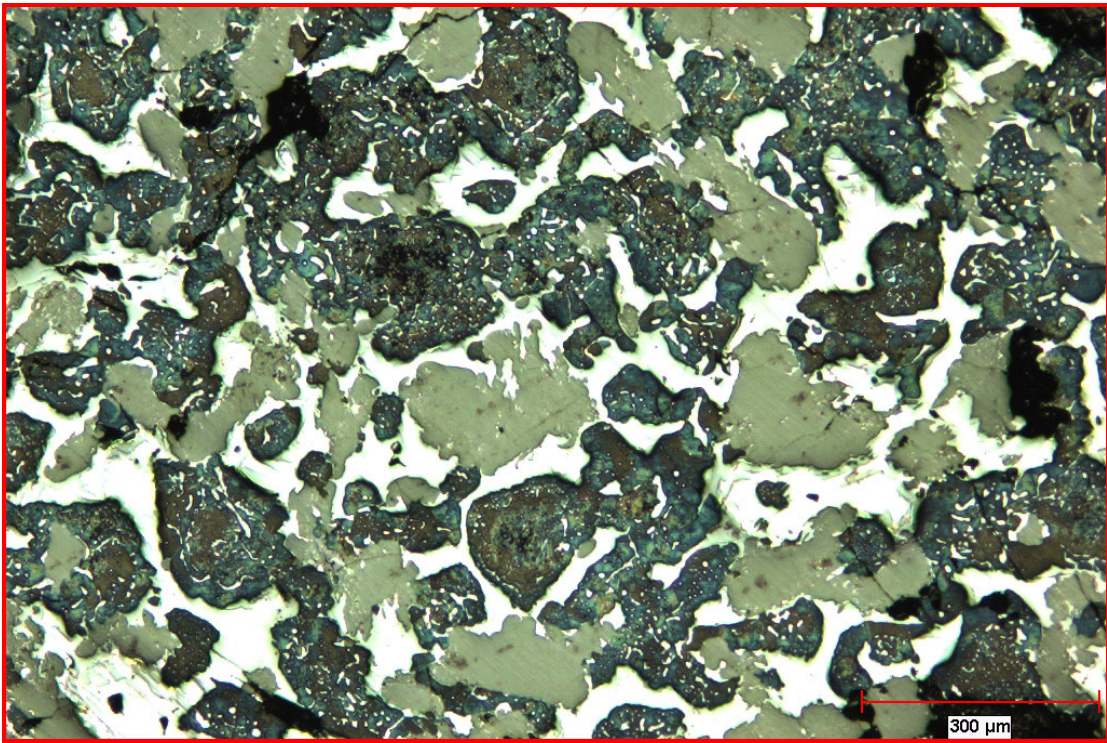
Şekil 6.4. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufuna ait XRD deseni

Farklı soğutma hızlarında soğutulan çelikhane cüruflarının mineralojik olarak pek bir farklılık göstermemesi sonucunda, mikroskop altında incelenerek faz boylarının öğütülebilirlik açısından değerlendirilmesi amacıyla parlatma numuneleri hazırlanmıştır. Opak bir yapıya sahip olan çelikhane cüruflarının mikroskop altında görülebilmesi için ilk etapta parlatılması ve ışığı yansıtır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, $-3,35+2,36$ mm boyutundaki çelikhane cürufu fraksiyonları reçineye gömülerek 24 saat beklenmektedir. Bu süre sonunda tamamen sertleşen reçine ve cüruf kompozit bir yapı oluşturmakta ve sonrasında,

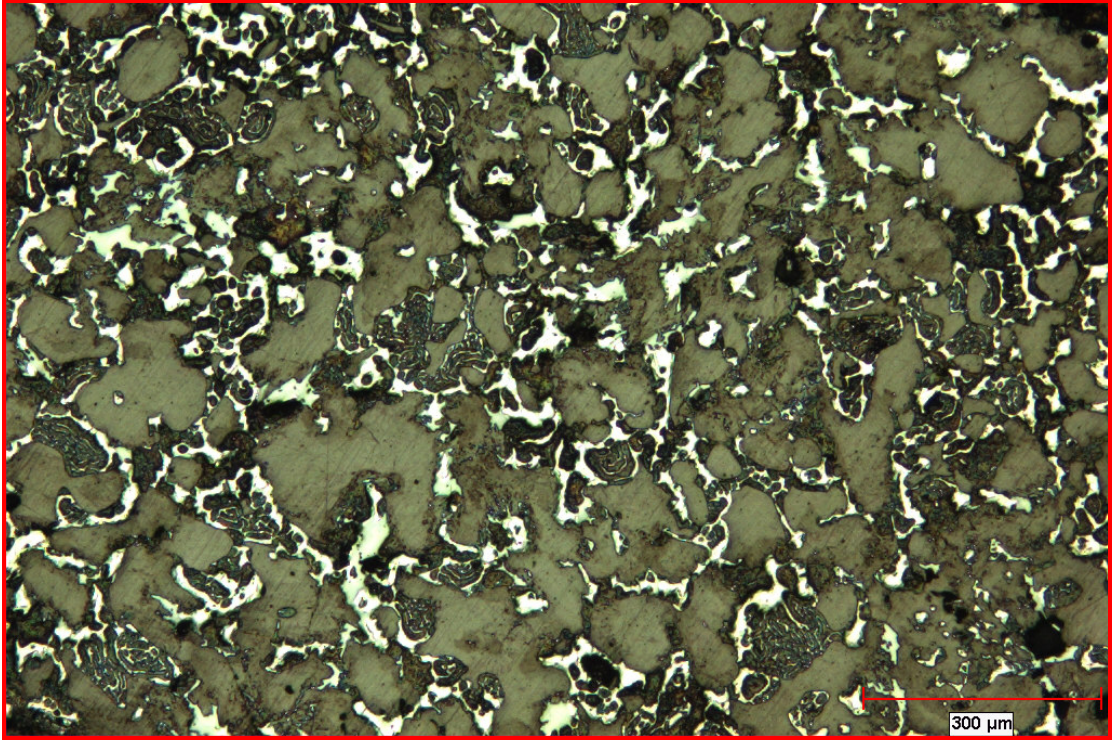
3 kademeli aşındırma ve tek kademeli keelemeye tabii tutulmaktadır. Bu işlemlerden sonra malzeme mikroskop altında görülebilir hale gelmektedir. Hazırlanan parlatma numunelerinin mikroskop altındaki görüntüleri Şekil 6.5-6.12’de verilmektedir.



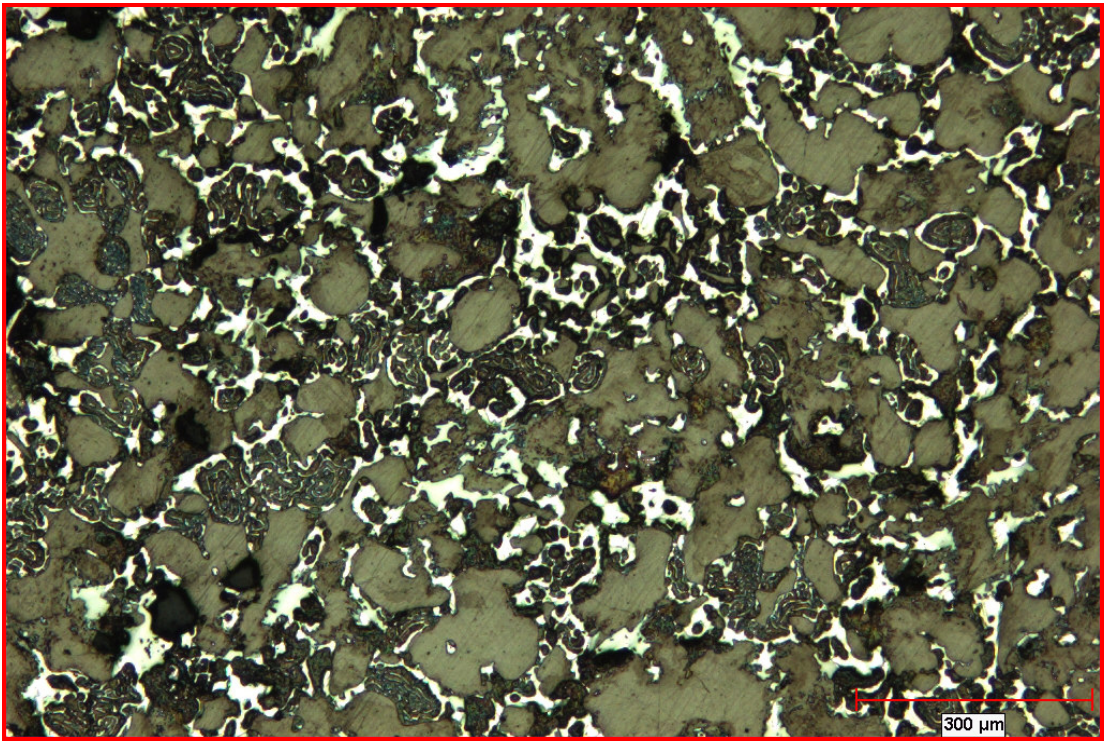
Şekil 6.5. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



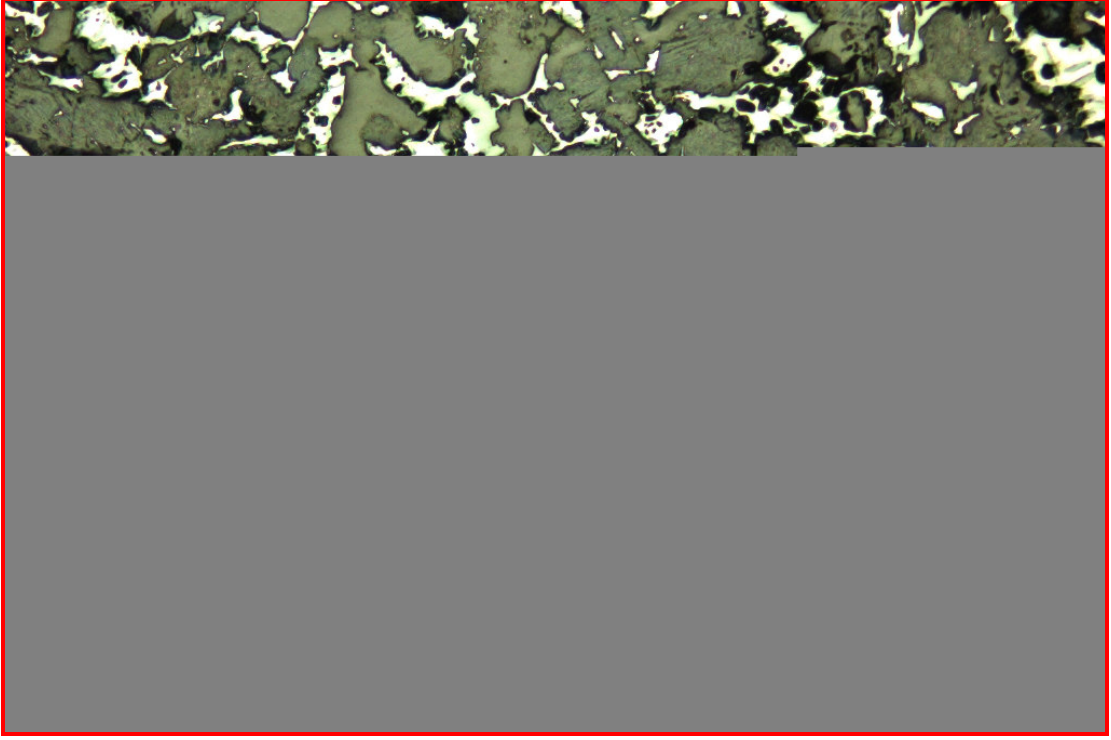
Şekil 6.6. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



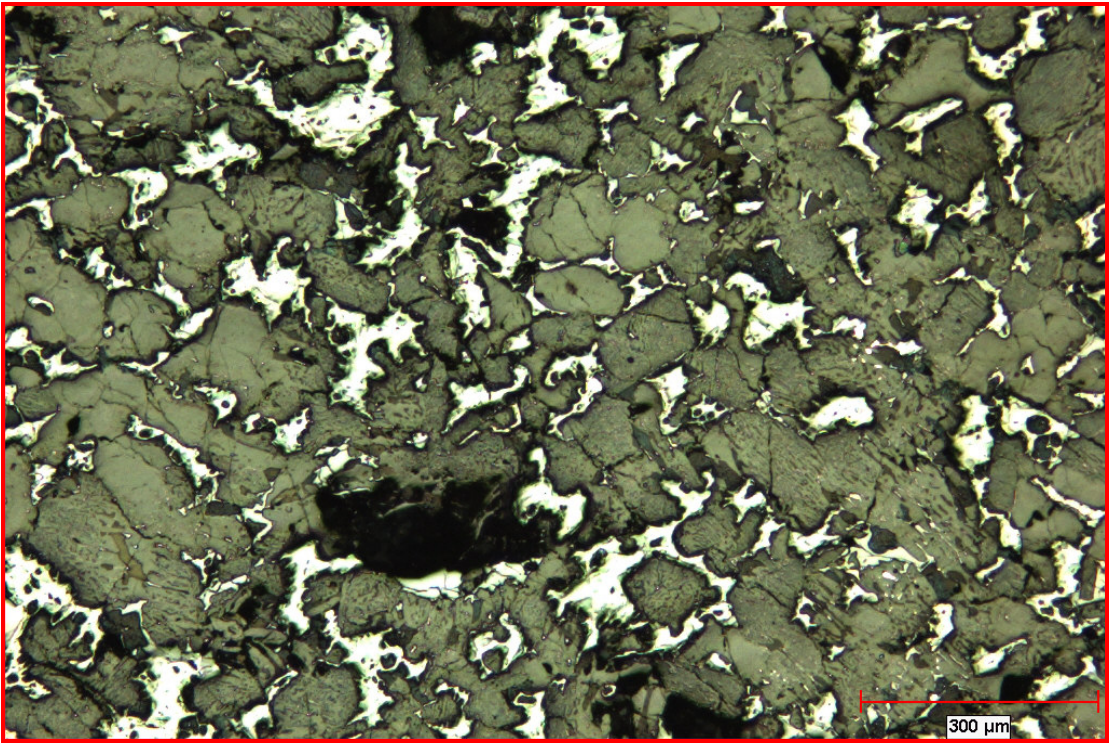
Şekil 6.7. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



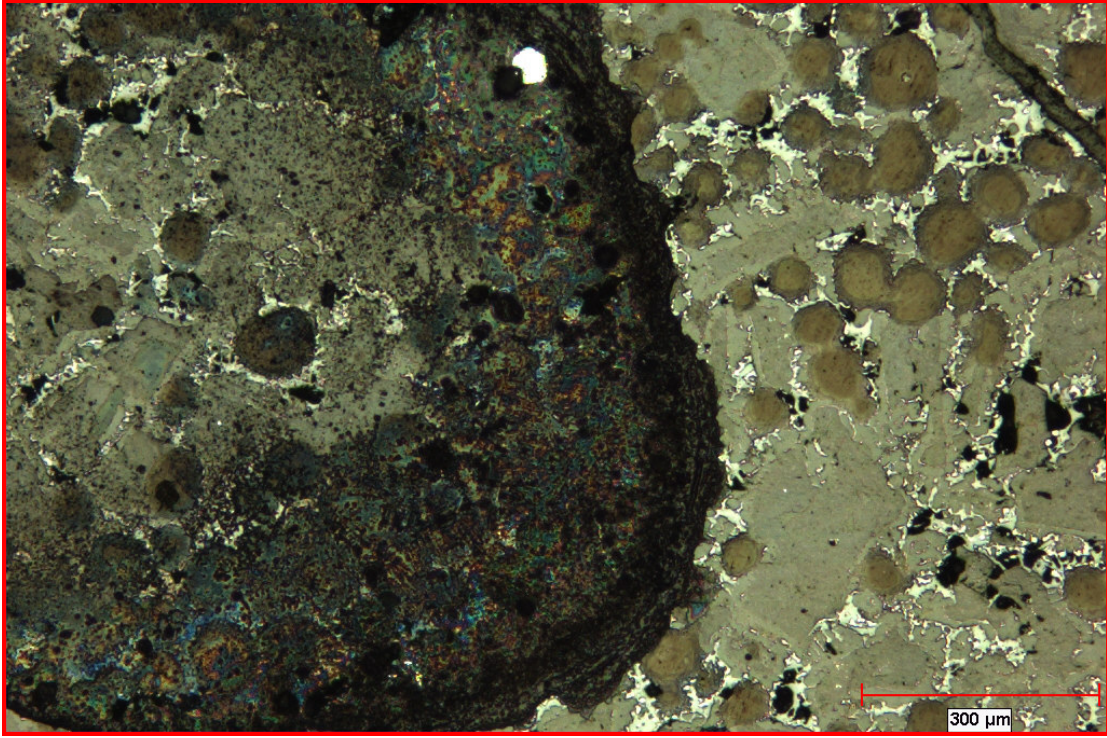
Şekil 6.8. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



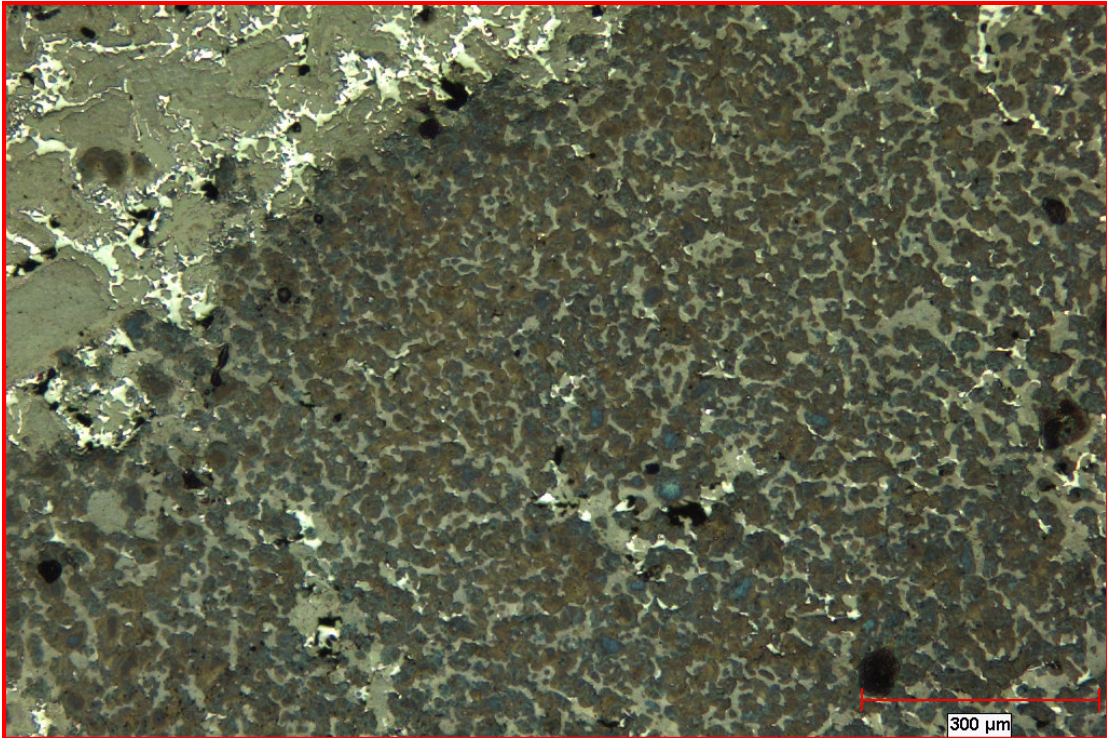
Şekil 6.9. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 6.10. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 6.11. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü



Şekil 6.12. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun mikroskop altındaki görüntüsü

6.3. Öğütme ve Kırılma Parametrelerinin Belirlenmesi

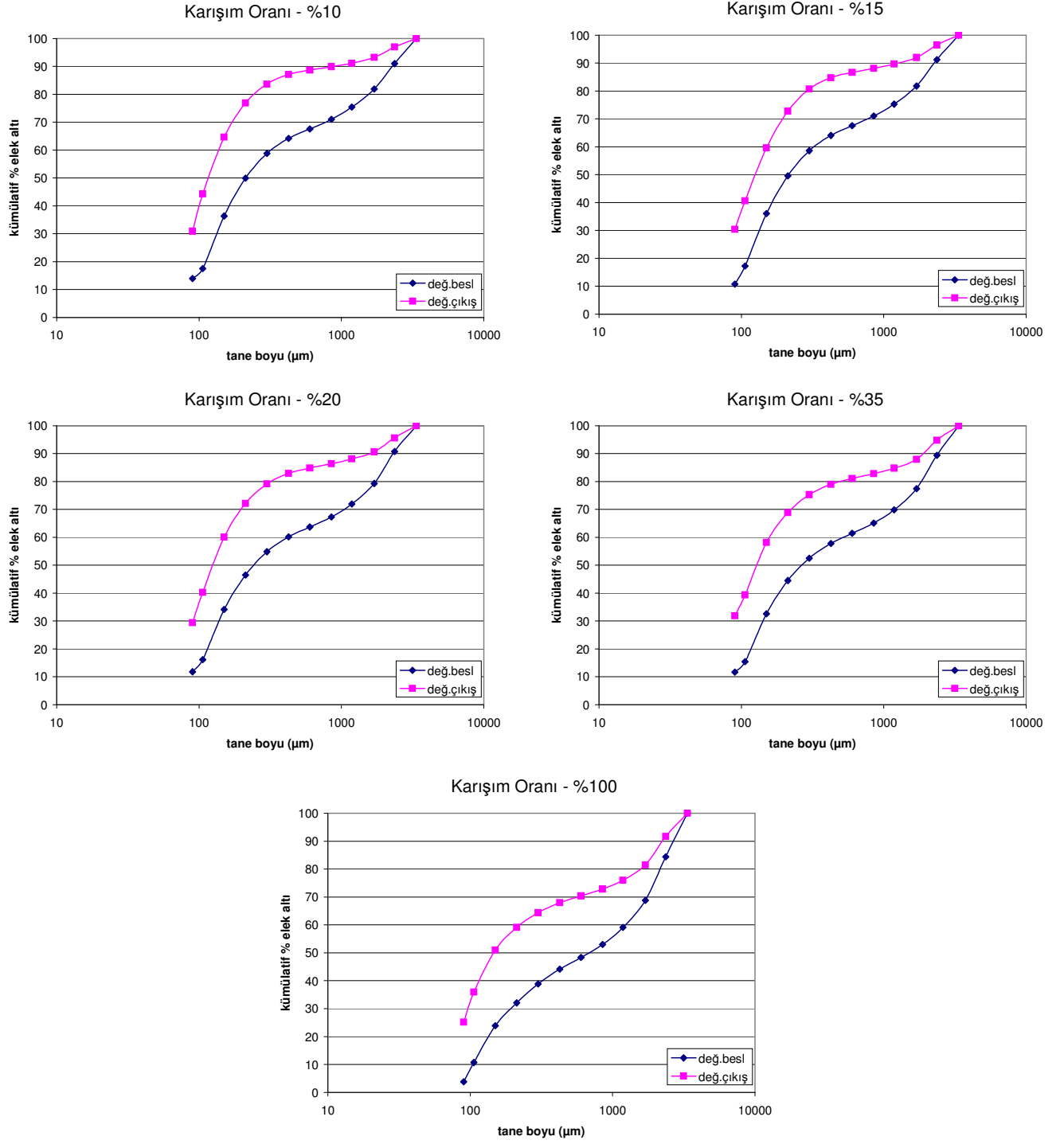
6.3.1. Standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi değerleri

Farklı soğutma hızlarında soğutulan çelikhane cüruflarının ve yüksek fırın cürufunun klinkere katkı olarak farklı oranlarda (10, 15, 20, 35, 100 %) katılması sonrasında elde edilen standart Bond bilyalı değirmen iş indeksi değerleri Çizelge 6.4'de verilmektedir. Denge durumundaki, değirmen giriş ve çıkış tane boyu dağılımları ise grafiksel olarak Şekil 6.13-6.16'da verilmektedir. (Değirmen giriş ve çıkış tane boyu dağılım değerleri çizelge halinde Ek-1'de verilmektedir.)

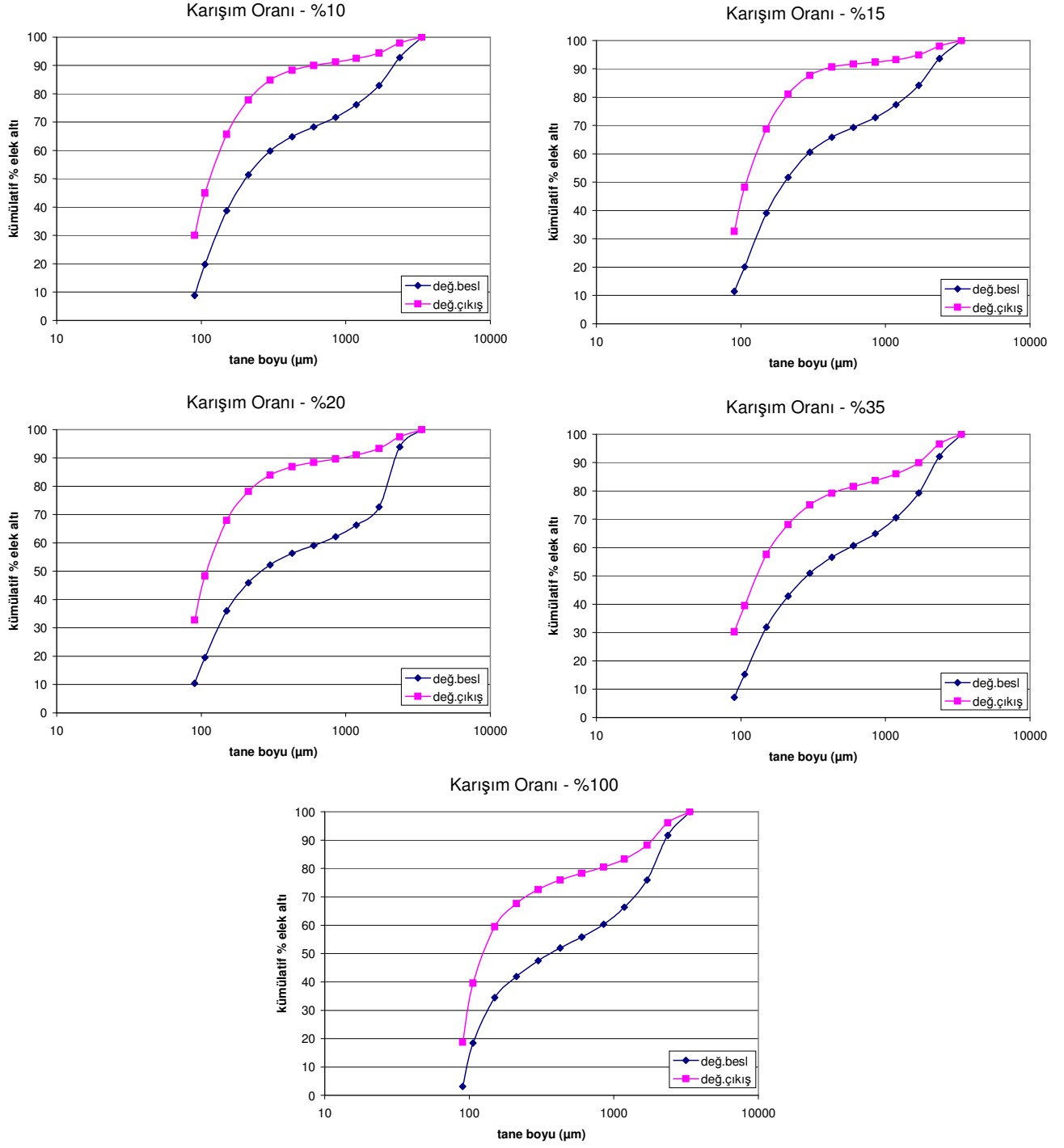
Çizelge 6.4. Cüruf/Klinker karışımlarına ait iş indeksi değerleri

	İş İndeksi (kWh/t)				
	Cüruf/Klinker Karışım Oranı (%)				
	10/90	15/85	20/80	35/65	100/0
Çelikhane Cürufu					
Kendiliğinden Soğuyan	15,34	16,35	16,95	17,85	21,86
Hızlı Soğuyan	15,44	16,41	17,25	18,29	22,70
Yavaş Soğuyan	15,11	16,20	16,66	17,48	21,33
Karıştırılarak Soğutulan	14,97	15,88	16,50	17,33	20,68
Granüle Yüksek Fırın Cürufu	15,23	16,28	16,82	17,73	21,54

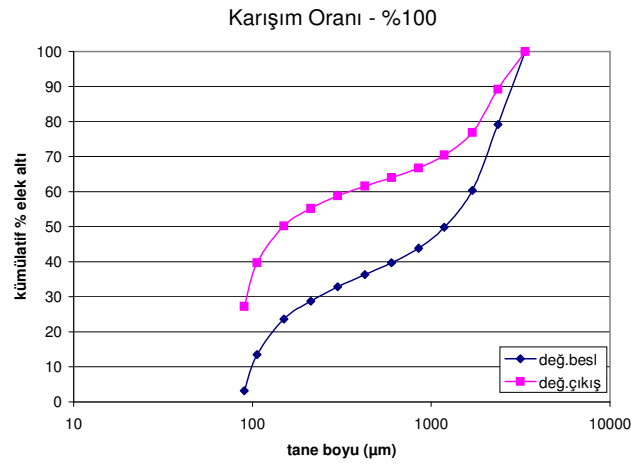
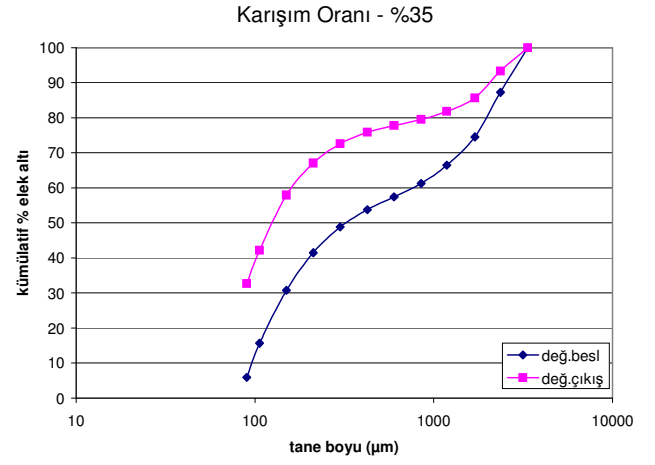
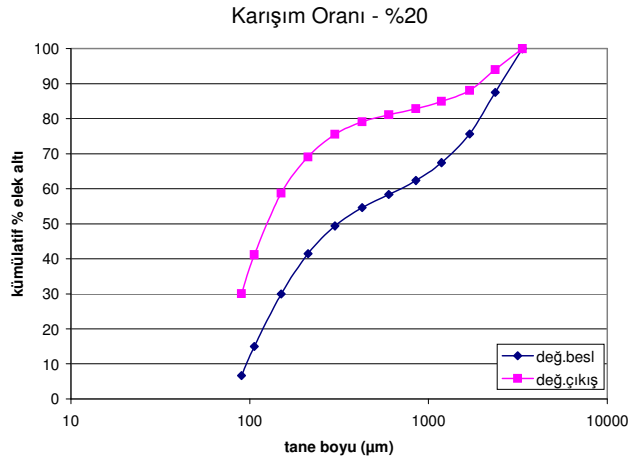
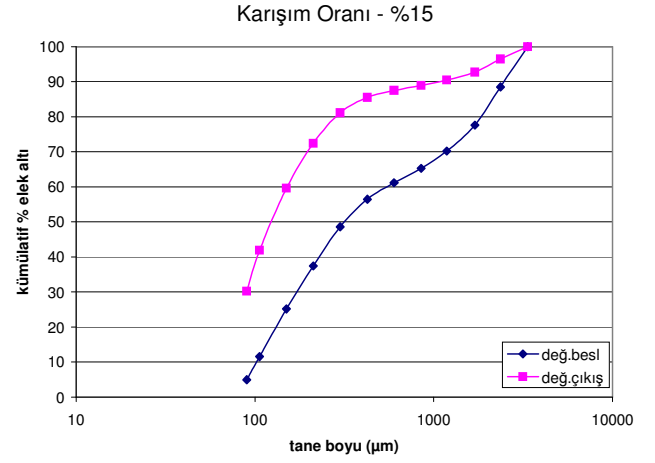
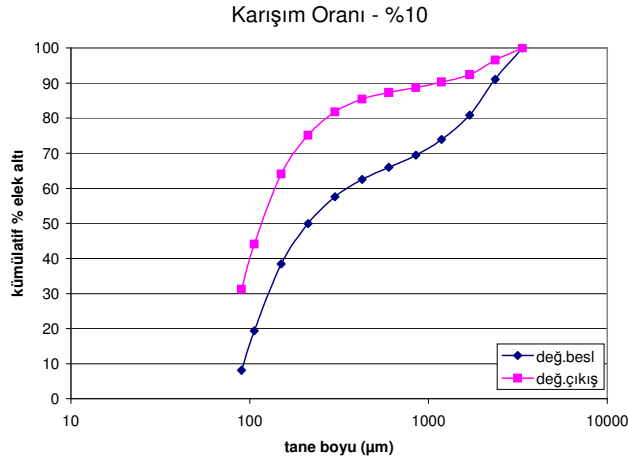
- Deneysel çalışmalarda kullanılan klinkerin iş indeksi değeri **12.91 kWh/t** 'dur.



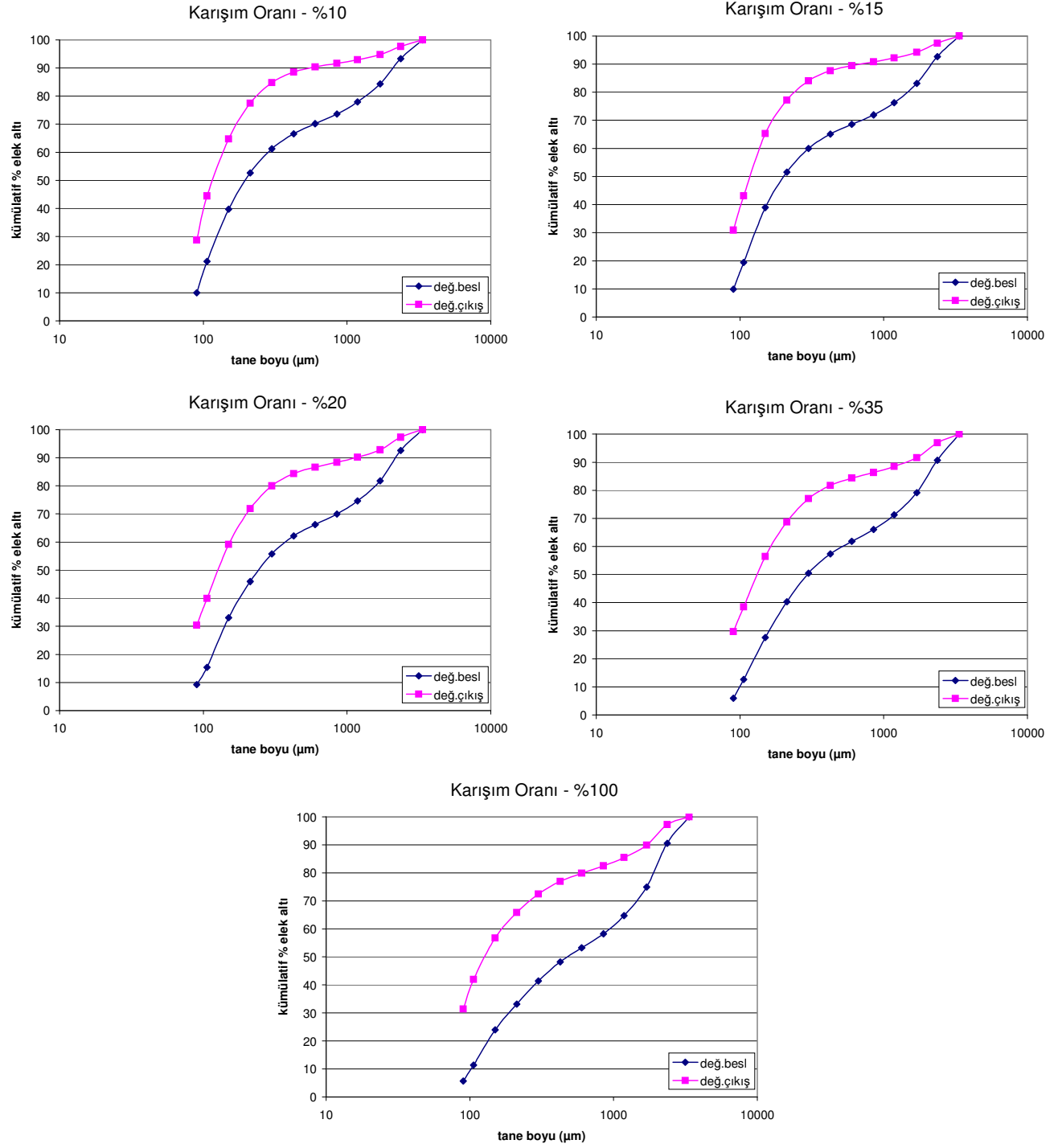
Şekil 6.13. Kendiliğinden soğuyan çelikhane cürufu katkı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları



Şekil 6.14. Hızlı soğuyan çelikhane cürufu katkılı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları



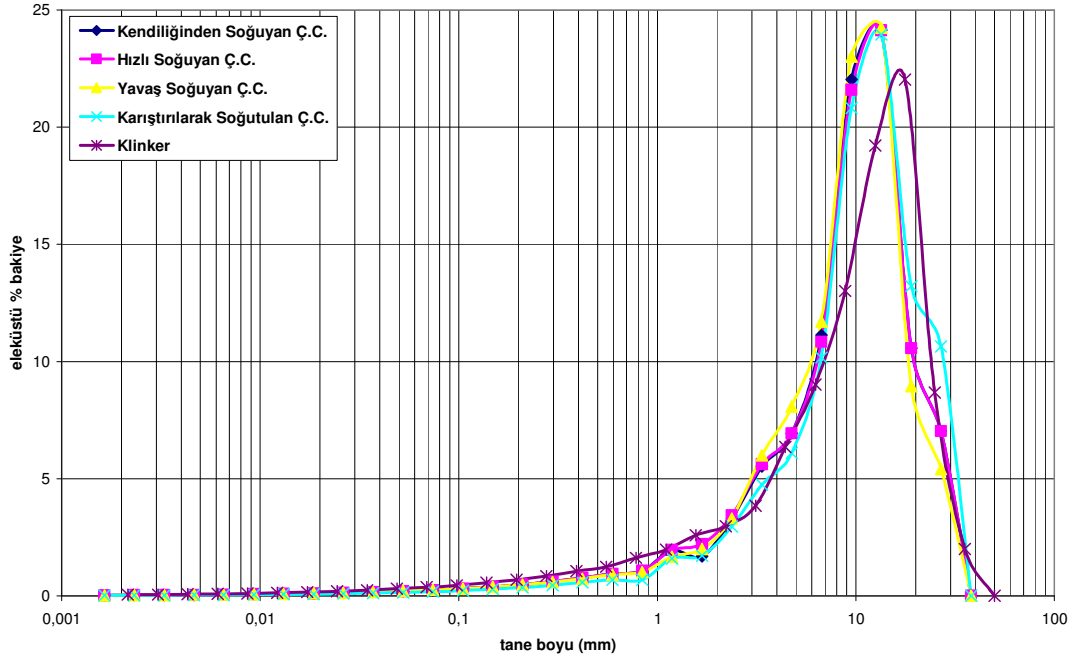
Şekil 6.15. Yavaş soğuyan çelikhane cürufu katkıli numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları



Şekil 6.16. Karıştırılarak soğutulan çelikhane cürufu katkı numunelerin Bond testi sırasında elde edilen değirmen giriş/çıkış tane boyu dağılımları

6.3.2. Kırılma dağılım fonksiyonları

Klinker ve çelikhane cürufu numunelerinin ağırlık düşürme testi sonucunda belirlenen kırılma dağılım fonksiyonları Şekil 6.17’de grafiksel olarak ifade edilmektedir. (Kırılma dağılım fonksiyonu çizelge halinde Ek-2’de verilmektedir.).

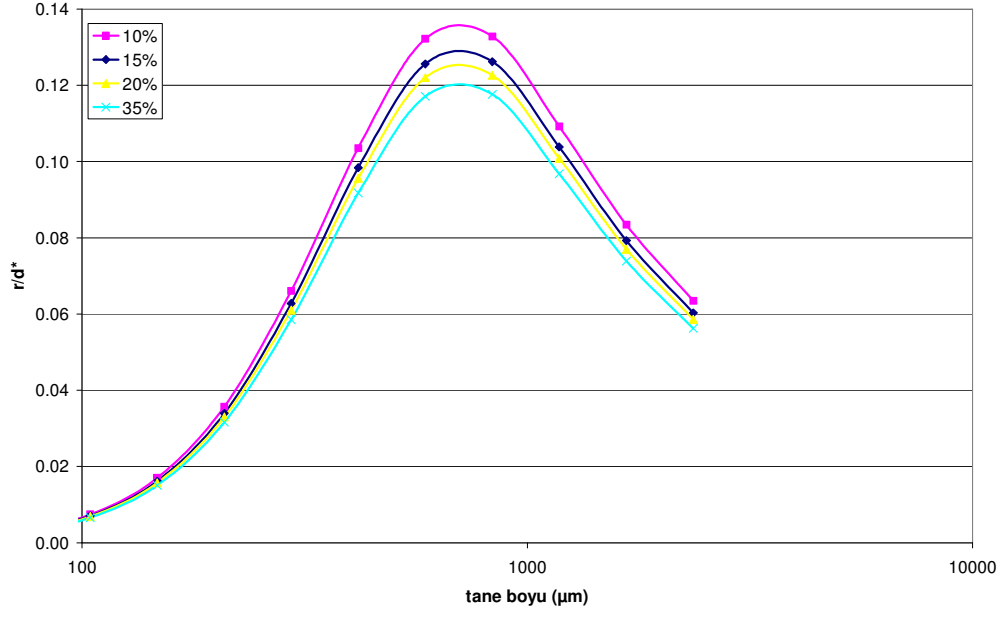


Şekil 6.17. Klinker ve çelikhane cüruflarına ait kırılma dağılım fonksiyonları

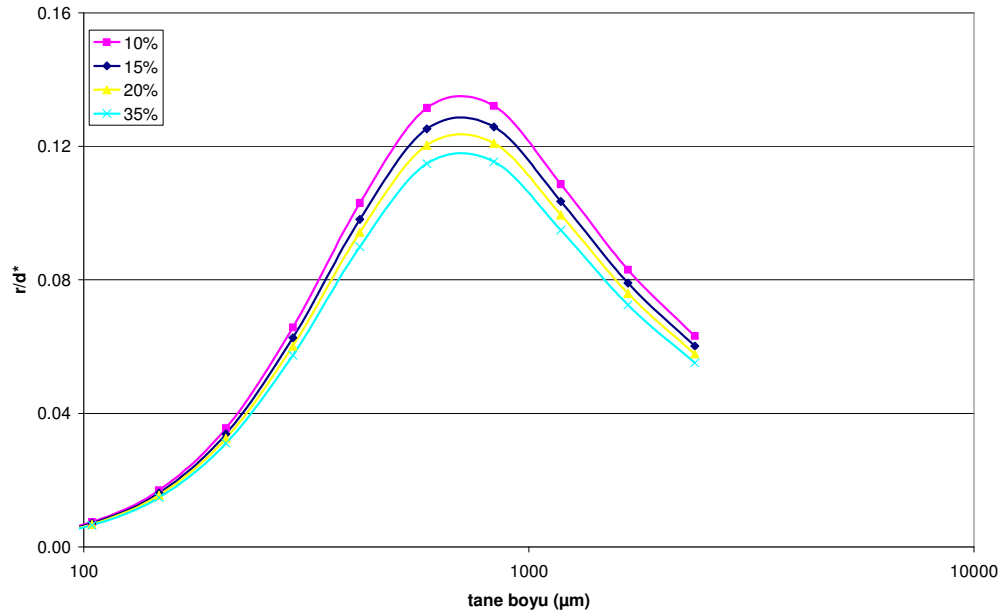
6.3.3. Kırılma hızı parametreleri

Standart Bond bilyalı değirmen öğütülebilirlik testi sırasında elde edilen, son periyoda ait, değirmen giriş ve çıkış tane boyu dağılımları ile kırılma dağılım fonksiyonları kullanılarak Eşitlik 4.12’den faydalanılarak mükemmel karışım modeli kırılma hızı parametresi r/d hesaplanmıştır.

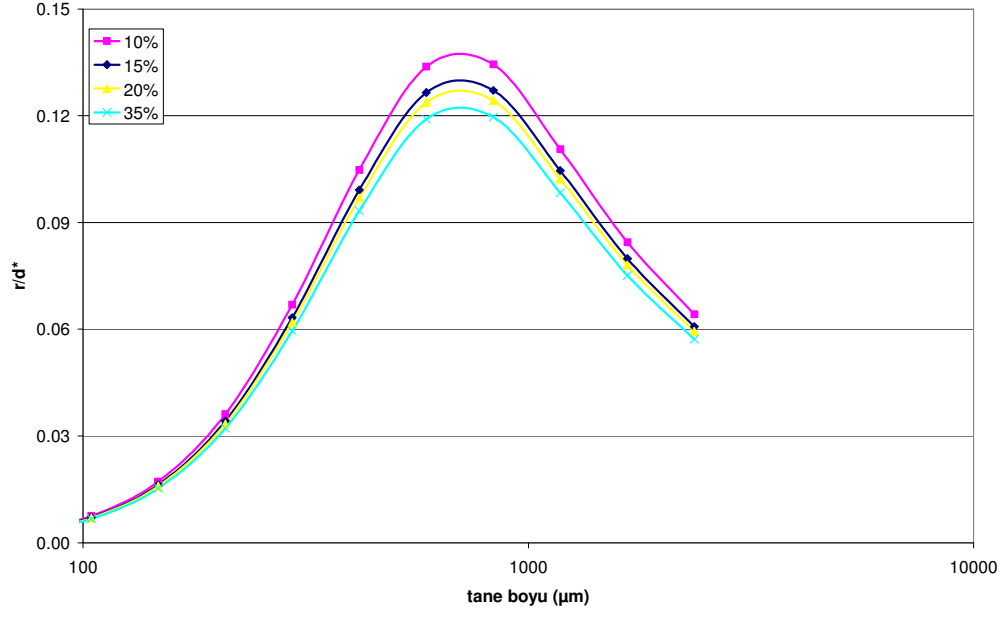
Laboratuvar ölçekli Bond değirmenine farklı oranlarda cüruf içeren klinker+cüruf karışımı beslendiği koşullarda yapılan modelleme çalışmaları sonucu elde edilen kırılma hızı parametrelerinin, karışım oranına göre değişimleri Şekil 6.18-6.21’de verilmektedir. (Kırılma hızı verileri çizelge halinde Ek-3’te verilmektedir.)



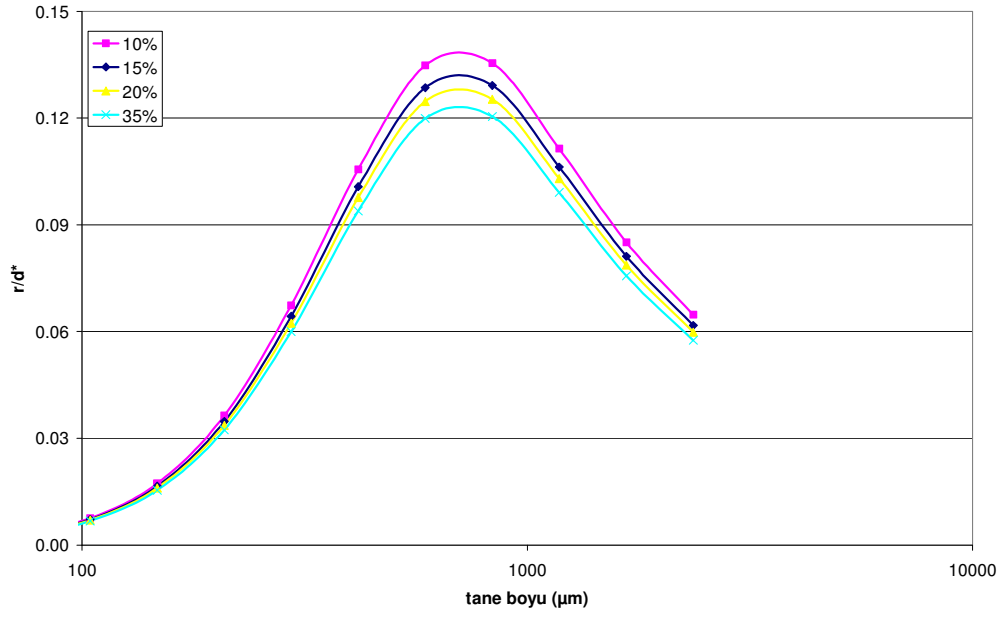
Şekil 6.18. Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi



Şekil 6.19. Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi

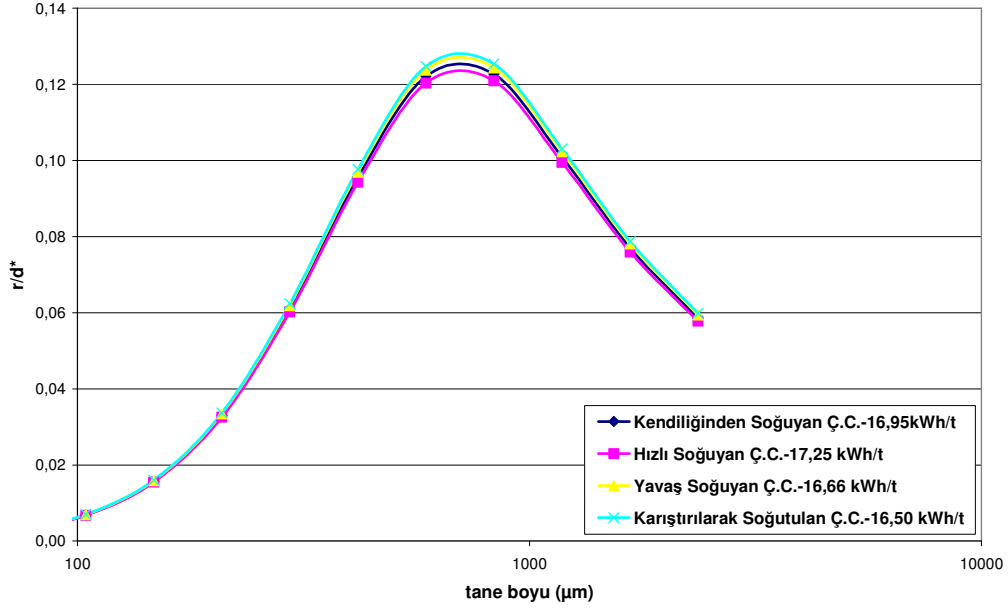


Şekil 6.20. Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi



Şekil 6.21. Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufunun farklı katkı oranları için klinker+cüruf karışımına ait kırılma hızı parametresi

Kırılma hızı grafiklerine bakıldığında, cürufklar kendi içinde değerlendirildiğinde katkı oranı ile artan iş indeksi değerine bağlı olarak kırılma hızı düşmektedir. Cüruf numunelerine ait kırılma hızlarını birbirleri ile kıyasladığımızda ise aynı şekilde iş indeksi değerine bağlı olarak kırılma hızının düştüğü görülmektedir. %20 çelikhane cürufu katkılı karışımlara ait kırılma hızları Şekil 6.22'de verilmektedir. Şekil incelendiğinde artan iş indeksine bağlı olarak kırılma hızı düşmektedir. Aynı şekilde diğer karışım oranları için de bu durum söz konusudur.



Şekil 6.22. %20 çelikhane cürufu katkılı karışımlara ait kırılma hızları

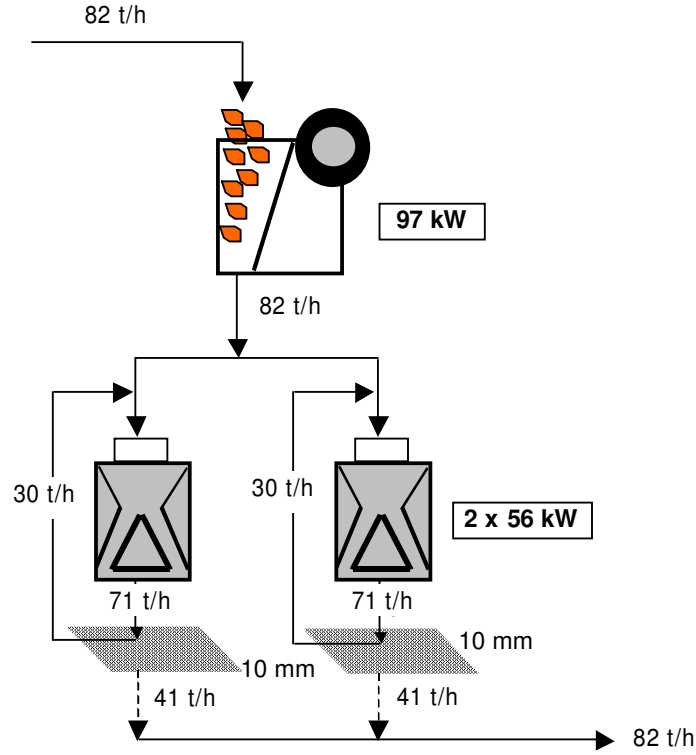
7. ÇELİKHANE CÜRUFU İÇİN ÖĞÜTME DEVRESİ TASARIMI

7.1. Çelikhane Cürufunun Öğütme Devresine Hazırlanması – Kırma Devresi

Çelikhane cüruflarının, çimento endüstrisinde katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi için göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardan bir tanesi besleme tane boyu dağılımıdır. Herhangi bir granülüzasyon işlemi yapılmadığı için parça halde elde edilen cüruflar, ancak iki kademeli bir kırma devresi sonrasında çimento prosesine sokulabilmektedir. Tasarlanacak olan bu kırma devresinin getireceği maliyet ve enerji tüketimi, prosesin ekonomikliği açısından değerlendirilmelidir.

10 mm'lik elekten kapalı devre çalışan, 82 t/h kapasiteli, bir çeneli ve iki konik kırıcıdan oluşan, iki aşamalı olarak tasarlanan bir kırma devresi Şekil 7.1'de verilmektedir. Tasarlanan bu kırma devresinin spesifik enerji tüketimi 2,55 kWh/t olarak hesaplanmıştır. Bu değerler ekipman motorları bazında hesaplanmıştır. Yardımcı ekipmanlar bu hesaplama dahil değildir.

Spesifik enerji tüketimine ilave olarak kırma devresinin işletilme güçlüğü, ekipman aşınma değerleri ve işçilik maliyetleri de göz önünde bulundurulması gereken önemli noktalardandır.



Şekil 7.1. Çelikhane cürufu için tasarlanan iki aşamalı kırma devresi

7.2. Konvansiyonel Bond Yöntemi ile Değirmen Tasarımı

Güç referanslı konvansiyonel Bond yöntemi, bilyalı değirmenlerin seçiminde ve ölçek büyütülmesinde hala en geçerli ve başarılı yöntemdir.

Bond yönteminde; %80'inin geçtiği tane boyu verilen belirli bir besleme hızına sahip malzemenin, %80'ini ürün tane boyutunun altına indirmek için gerekli enerji hesaplanmaktadır. Daha sonra, Bond (1961) tarafından geliştirilen ampirik eşitlikler kullanılarak ölçek büyütme işlemi gerçekleştirilmekte ve değirmen boyutlandırması yapılmaktadır. Sonuca ulaşabilmek için; Bond iş indeksi değerinin bilinmesi gerekmektedir.

Tasarlanan İki aşama kırma devresi sonucunda elde edilen -10 mm tane boyuna sahip cüruf, %20 katkı oranında klinkere katılarak tipik bir çimento inceliğine öğütülmek üzere, konvansiyonel Bond yöntemi kullanılarak, 100 t/h kapasiteli bir öğütme devresi göz önüne alınarak, separatörle kapalı devre çalışan bir bilyalı değirmen seçimi yapılmıştır. 16,95 kWh/t'luk bir iş indeksi değerine sahip cüruf

klinker karışımını çimento inceliğine öğütebilmek için kullanılacak değirmenin teknik verileri Çizelge 7.1'de sunulmaktadır. Devrenin kapasiteye uygun olarak seçilmiş yüksek verimli bir havalı separatör ile çalıştırılacağı göz önünde bulundurulmuştur.

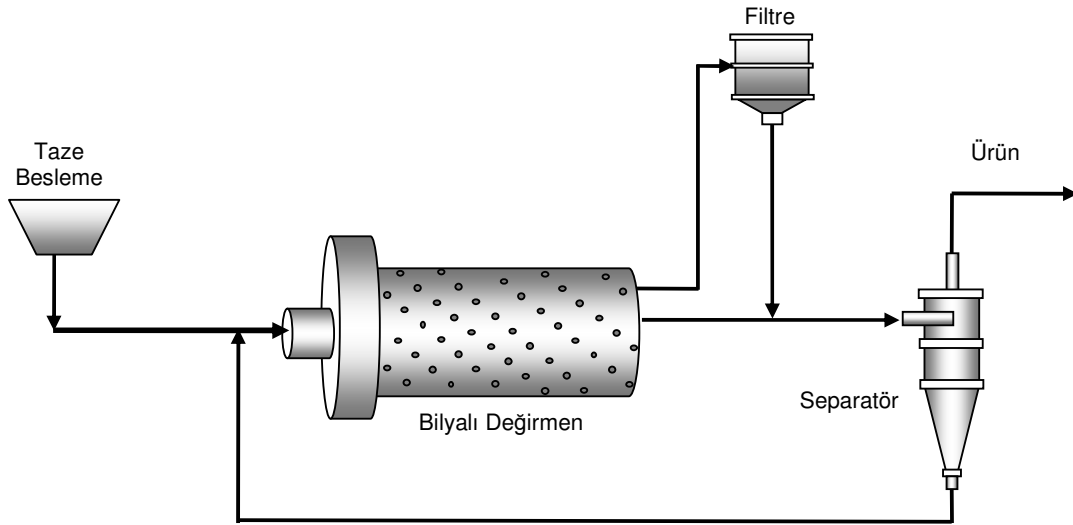
Çizelge 7.1. Bilyalı değirmen teknik verileri

Motor Gücü (kW)	5251
Çap (m)	4,88
Boy (m)	10,60
İç Çap (m)	4,69
Bilya Şarjı (%)	35
% Kritik Hız	68,9

7.3. Simülasyon ile Devre Tasarımı

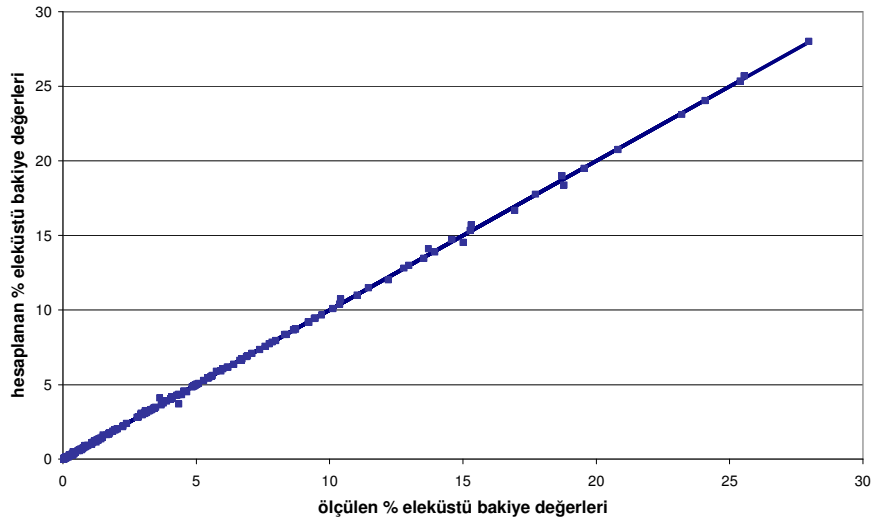
Bu çalışma kapsamında, bir çimento fabrikasının separatörle kapalı devre çalışan iki kamaralı bir bilyalı değirmenden oluşan çimento öğütme devresi baz alınmıştır.

Çimento öğütme devresi akım şeması Şekil 7.2'de verilmektedir.



Şekil 7.2. Çimento öğütme devresi akım şeması

Bu öğütme devresi, daha önceden yürütölmüş olan örnekleme çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ışığında modellenmiştir. Örnekleme çalışmaları sırasında, sistem dengedeyken devre etrafından ve ani duruş sonrası değirmen içinden numuneler alınarak, devre etrafı ve değirmen içi tane boyu dağılımları belirlenmiştir. Bu veriler kullanılarak oluşturulan model devredeki tüm akışları ve akış kollarındaki tane boyu dağılımlarını tahmin etmektedir. Devre modellenirken; bilyalı değirmen için ‘Mükemmel Karışım Modeli’ (Bölüm 4.2.2.2), separatör içinse ‘Verimlilik Eğrisi Modeli’ kullanılmıştır. Modelleme çalışması sonucunda, devre etrafı akışlara ait hesaplanan tane boyu dağılımları ile örnekleme döneminde ölçölen tane boyu dağılımları arasındaki ilişkiyi ifade eden grafik Şekil 7.3’te verilmektedir. Şekil 7.3’ten göröldüğü üzere ölçölen ve hesaplanan değğerlerin $y=x$ doğrusu üzerinde yer alması modelin gücünü göstermektedir.



Şekil 7.3. Madde denkliğı sonucunda hesaplanan tane boyu dağılımları ile ölçölen tane boyu dağılımları arasındaki ilişki

Bilyalı değirmene ve havalı separatöre ait model parametreleri Çizelge 7.2.’de verilmektedir.

Çizelge 7.2. Bilyalı değirmen ve havalı separatör model parametreleri

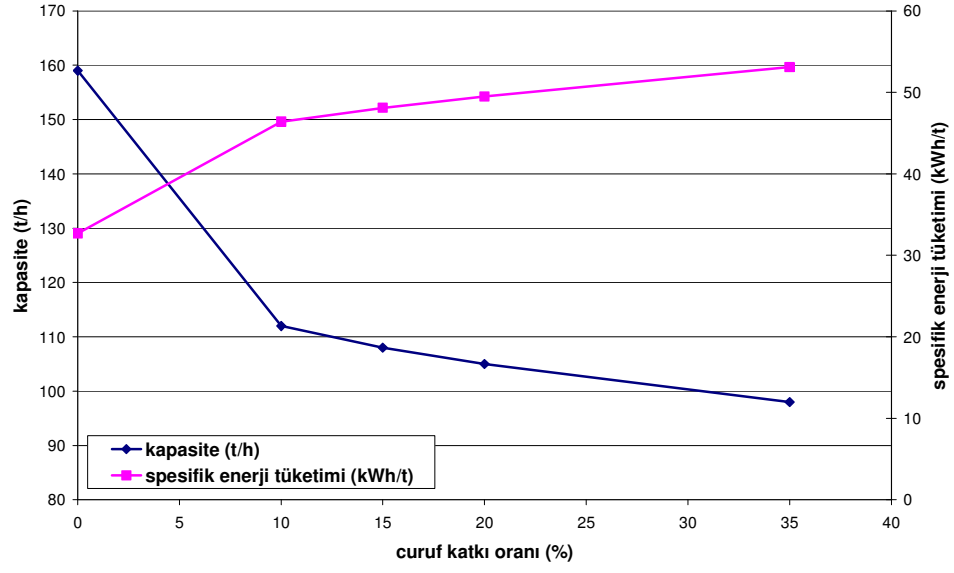
Bilyalı Değirmen				Havalı Separatör	
1. Kamara		2. Kamara			
t.boyu (mm)	Ln (r/d*)	t.boyu (mm)	Ln (r/d*)	C	37,93
0,045	-0,473	0,045	-1,39	α	0,500
0,150	1,02	0,150	0,111	β	2,82
0,850	2,23	0,850	1,50	d_{50c}	0,049
4,75	3,33	4,75	1,63	β^*	6,46

Öğütme devresinde yer alan bilyalı değirmene ait teknik veriler Çizelge 7.3'te sunulmaktadır.

Çizelge 7.3. Bilyalı değirmen teknik verileri

Motor Gücü (kW)	5200
Çap (m)	4,8
Boy (m)	14,45
% Kritik Hız	77,02
Bilya Şarjı (%)	
1.Kamara	32,3
2.Kamara	31,2

Normal koşullarda 159 t/h'lik bir taze besleme ile çalıştırılan devreye, simülasyon çalışması kapsamında, farklı cüruf katkı oranlarında klinker cüruf karışımı beslenerek, normal koşullardaki ürünün elde edilebilmesi için kapasitedeki değişimin ne yönde olacağı incelenmiştir. Bu kapsamda devreye %10,15,20 ve 35 oranında cüruf katkılı klinker cüruf karışımları beslenmiştir. Bu çalışma sırasında yavaş soğuyan cüruf numunesi klinkere katkı olarak kullanılmıştır. Çalışma sonucunda katkı oranındaki artışa bağlı olarak kapasitenin düştüğü ve buna bağlı olarak da değirmen motor gücü baz alınarak hesaplanan spesifik enerji tüketiminin arttığı gözlemlenmiştir. Cüruf katkı oranına bağlı olarak, kapasite ve spesifik enerji tüketimindeki değişim Şekil 7.'de verilmektedir.



Şekil 7.4. Cüruf katkı oranı ile kapasite ve spesifik enerji tüketimindeki değişim

8. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Çelik üretim prosesini ergimiş halde terk eden çelikhane cürufunun farklı hızlarda soğutulmasının, kimyasal ve mineralojik yapıda dikkate değer bir değişim meydana getirmediği görülmüştür. Çelikhane cüruflarının kimyasal kompozisyonu verilen sınır değerler arasında kalmaktadır ve aynı fazları içermektedirler.

Mineralojik olarak bir değerlendirme yapıldığında ise; Hızlı Soğuyan ile Kendiliğinden Soğuyan ve Yavaş Soğuyan ile Karıştırılarak Soğutulan çelikhane cürufları aynı fazları içermektedir. Yavaş Soğuyan ve Karıştırılarak Soğutulan çelikhane cüruflarında klinker bileşiminde bulunan ve çimentoda uzun dönemde dayanım sağlayan larnit'e (β -C₂S) rastlanmıştır. Literatürde de bu verileri destekleyecek çalışmalar Bölüm 2'de sunulmuştur. Şekil 2.8'de uzun dönem basma dayanımının daha hızlı geliştiği izlenebilmektedir.

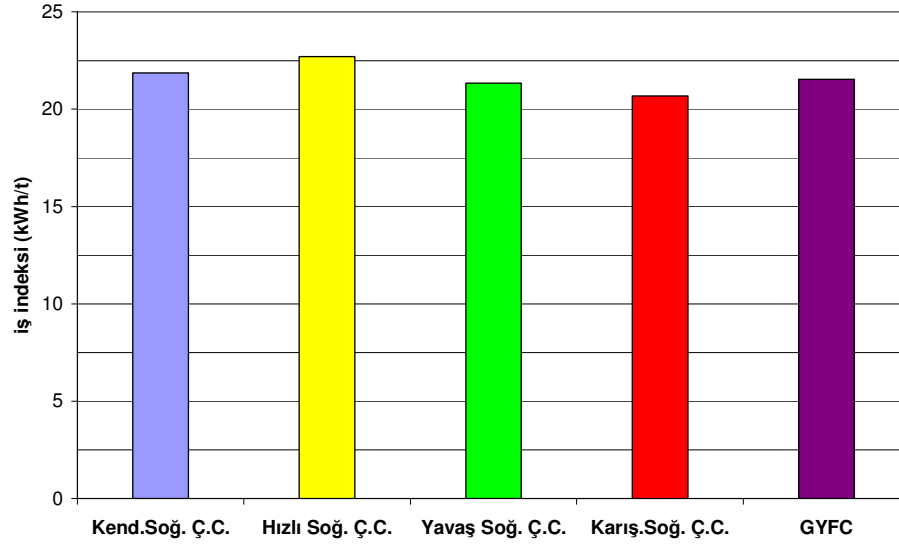
Mikroskop görüntüleri incelendiğinde ise numunelerin tamamında metalik demir (beyaz kısımlar), fazlar arasında yer almaktadır. Cürufların soğutulması sırasında ergimiş haldeki demir katılaşarak fazlar arasına yerleşmektedir. Fe içeriğindeki artışa bağlı olarak malzemenin çimento katkı olarak kullanılabilirliği üretim prosesi ile doğrudan ilgilidir. Cüruftaki demir içeriğinin yüksek olması malzemenin cüruf kullanım standardının dışında kalmasına neden olabilmektedir.

Kendiliğinden Soğuyan ile Hızlı Soğuyan çelikhane cüruflarının aynı yapıya sahip oldukları sadece mineral faz boylarının farklılık gösterdiği görülmektedir. Karıştırılarak Soğutulan çelikhane cürufunda ise, soğuma işlemine, cürufun karıştırılarak, müdahale edilmesi sonucunda karmaşık bir yapının ortaya çıktığı söylenebilir. Soğuma işlemi sırasında karıştırılarak verilen mekanik etkinin yapı üzerinde etkili olduğunu söyleyebiliriz.

Soğutma işlemlerinin birbirlerinden gerçek anlamda farklı olmadıkları düşünülmektedir. Bölüm 2.1.2'de verildiği üzere literatürdeki çok farklı soğutma tekniklerinden bahsedilmektedir. Bu soğutma teknikleri arasında öğütülebilirlik veya mineralojik farklılıklar ortaya çıkmadığı düşünülmektedir. Elde edilen bulgular farklı soğutma metodlarının kendi halinde soğutmanın bir türevi olduğunu

göstermektedir. Yapılan XRD ve mineralojik çalışmalar da bulguları destekler niteliktedir.

Cüruf numunelerine ait iş indeksi değerleri Şekil 8.1’de grafiksel olarak verilmektedir.



Şekil 8.1. Cüruflara ait iş indeksi değerleri

Elde edilen bulgular ışığında, Şekil 8.1.’den izlenebileceği gibi, farklı soğutma hızlarında elde edilen iş indeksi değerleri arasındaki değişim maksimum %10 mertebesinde olmuştur.

Endüstriyel bir tesisin atığı olan cürufların üretimi tesisin o anki koşullarına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu nedenle, %10’luk bir değişim homojen olmayan bir malzeme için önemli bir değişim olarak değerlendirilmemelidir. Ancak bu salınımlar nihai çimento kalitesine etki edebileceğinden istatistiksel olarak bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Uzun dönemli veriler alınarak cüruf öğütülebilirliğinin salınım aralığı değerlendirilmelidir.

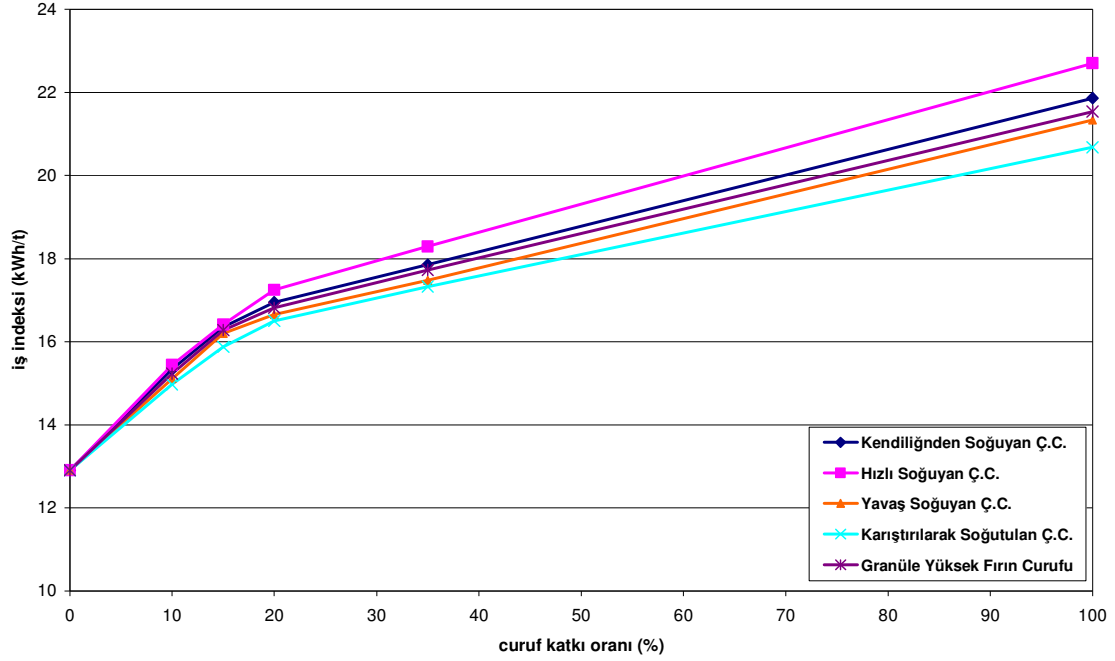
Bu sonuçlara ilave olarak Bölüm 6.3.2 Şekil 6.17’de verilen kırılma dağılım fonksiyonları malzemenin darbe altındaki davranımının göstergesidir. Bu değerlendirme ışığında da bir farklılık ortaya çıkmamıştır. Ayrıca klinker ve cüruf

numuneleri aynı enerji seviyesinden kırıldıklarında, oluşan ürünlerin boyut dağılımları birbirine yakın olmaktadır. Elde edilen kırılma hızı verileri incelendiğinde, numuneler kendi içerisinde değerlendirilecek olursa, beklendiği üzere cüruf katkı oranına bağlı olarak öğütülebilirlikteki azalma kırılma hızını düşürmektedir. Bunun doğal bir yansıması olarak da cüruf katkı oranı ile birlikte üretim kapasitesi de düşecektir. Bunun yanında çelikhane cüruflarının çimento üretim prosesinde, nihai ürün kalitesi bazında değerlendirildiğinde belirli bir kullanım oranı olduğu belirlenmiştir ve bu durum Bölüm 2 Şekil 2.10'da verilmektedir.

Bölüm 3.2.2'de farklı çimento öğütme teknolojilerinden bahsedilmiştir. Bu tez kapsamında, bilyalı değirmen kullanımına ilişkin bir değerlendirme yapılmıştır. Farklı öğütme teknolojilerinin kullanılabilmesi için herhangi bir değerlendirme yapılmamıştır. Ancak detaylı bir çalışma sonucunda bu öğütme teknolojilerinin kullanımı ile birlikte spesifik enerji tüketiminin azaltılabileceği ortaya çıkabilecektir.

Bu nedenle basınç altında malzemenin davranımının incelenmesi ve farklı soğutma hızlarının etkisinin bu açıdan değerlendirilmesi gerekmektedir.

İş indeksi değerlerinin cüruf katkı oranına bağlı değişimi Şekil 8.2'de verilmektedir.



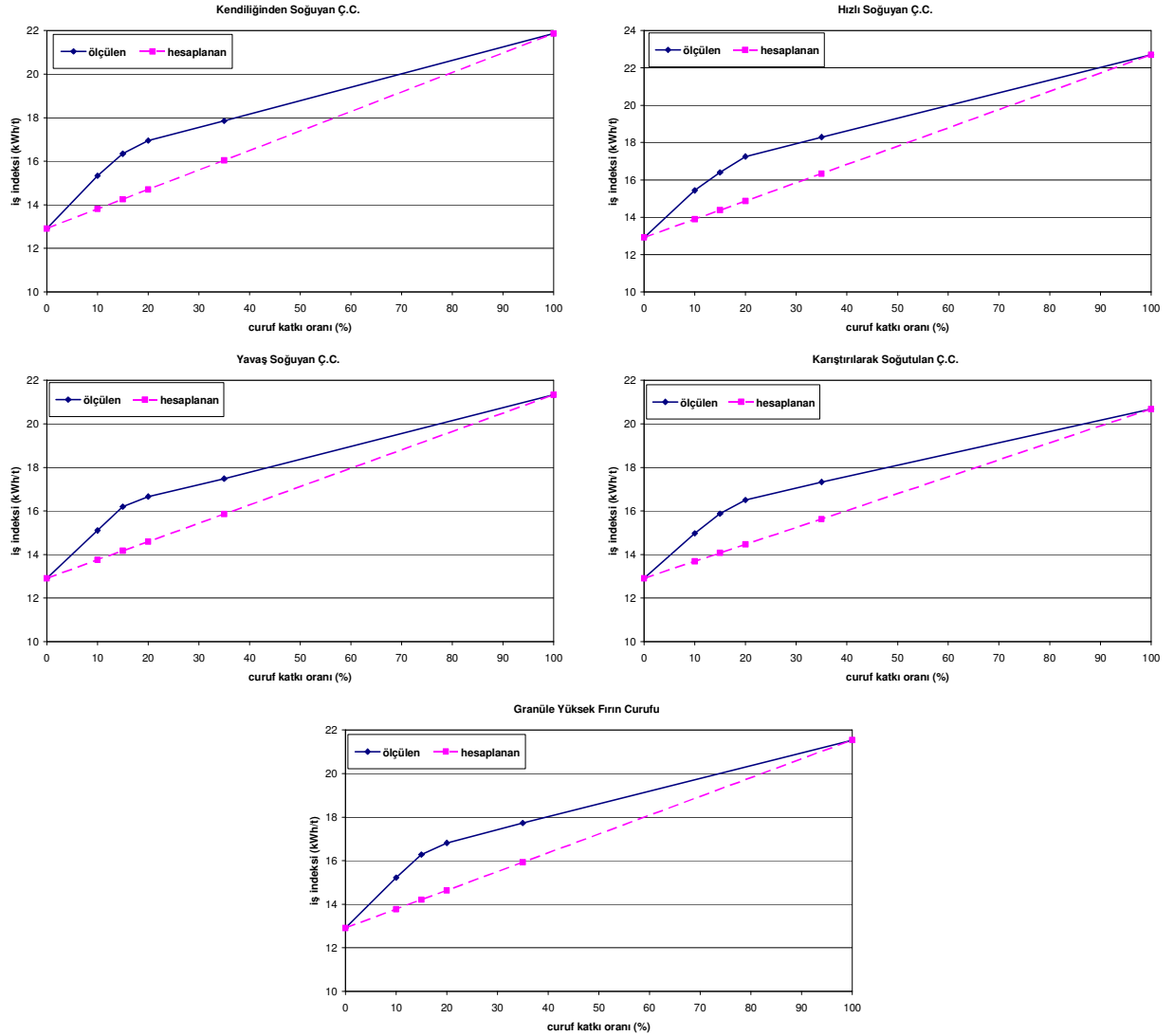
Şekil 8.2. Cüruf katkı oranına bağlı olarak iş indeksi değerlerindeki değişim

Şekil 8.2'den görüldüğü üzere, iş indeksi değerleri kendi içinde değerlendirildiklerinde, katkı oranındaki artış, tahmin edileceği gibi iş indeksi değerinde artışa sebep olmaktadır.

Değişik öğütülebilirlikteki malzemeler karıştırıldıklarında, karışımın öğütülebilirliğinin genellikle bileşenlerin öğütülebilirlik değerlerinin oransal ortalaması olacağı sanılmaktadır. Fakat bileşenlerin beraber öğütülmesi sırasında malzeme iç etkileşimleri sonucu öğütülebilirlik değerleri bu ortalamalardan sapmaktadır. Benzer bir durum Günlü (1999) tarafından, yüksek fırın cürufu için yaptığı bir çalışmada da görülmektedir.

Şekil 8.3'te klinker ve cüruf numunelerinin farklı karışım oranlarında birlikte öğütülmeleri sonucunda belirlenen iş indeksi değerleri (ölçülen) ile ayrı ayrı öğütülmeleri sonrasında elde edilen iş indeksi değerlerinden ağırlıklı ortalamayla aynı karışım oranları için hesaplanan iş indeksi değerleri verilmektedir. Karışımların iş indeksi değerlerinin, bileşenlerin ayrı ayrı öğütülmesi sonucunda elde edilen iş indeksi değerlerinin oransal ortalamasından yüksek olduğu görülmektedir. Aradaki bu fark, bileşenlerin birlikte öğütülmesi durumunda

harcanacak spesifik enerji tüketiminin, karışım bileşenlerinin ayrı ayrı öğütülmesi durumundaki toplam spesifik enerji tüketiminden daha yüksek olacağını göstermektedir.



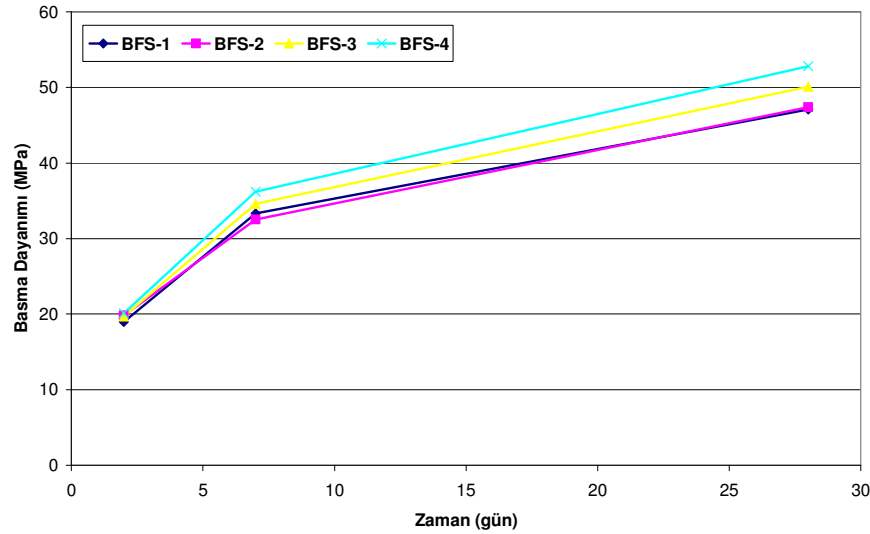
Şekil 8.3. Ölçülen ve hesaplanan iş indeksi değerleri

Çimento dayanım testleri sırasında, TS EN 197'de belirtilen ve kütlece %65-79 klinker ile %21-35 yüksek fırın cürufu ihtiva eden Portland-Cürufllu Çimento (CEM-II / B-S 42,5 R) baz alınarak, %21,43 oranında farklı inceliklerde yüksek fırın cürufu içeren karışımlar hazırlanmıştır. Sonrasında ise toplam cüruf oranı sabit kalmak koşulu ile yüksek fırın cürufu, aynı inceliğe sahip çelikhane cürufu ile değişik oranlarda yer değiştirerek çelikhane cürufu katkılı ve yüksek fırın

cürufu+çelikhane cürufu katkılı çimento örnekleri hazırlanarak elde edilecek veriler ışığında bir kıyaslama yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, cüruf soğutma hızının mineralojik yapıda meydana getireceği değişimin, çimento dayanımı üzerindeki etkisi incelenmemiştir.

TS EN 197'de CEM-II / B-S 42,5 R tipi çimentonun 2 günlük basınç mukavemeti 20 MPa ve üzeri, 28 günlük basınç mukavemeti ise 42,5 ile 62,5 MPa olarak belirlenmiştir.

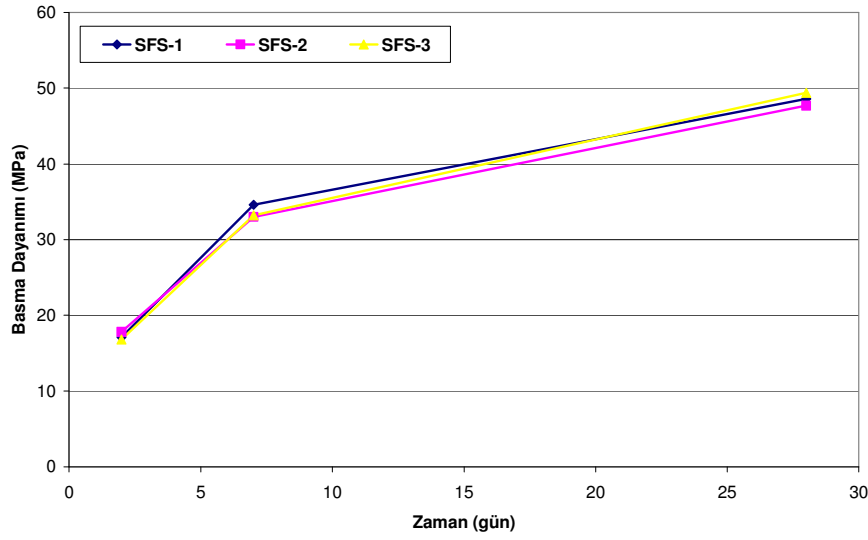
Şekil 8.4'de farklı inceliklerde %21,43 oranında yüksek fırın cürufu içeren karışımlara ait 2, 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri verilmektedir. Şekil 8.4'den görüldüğü üzere basınç mukavemeti değerlerinin belirtilen standart değerlere uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca cüruf inceliğindeki artışın bu değerleri olumlu yönde etkilediği gözlemlenmektedir. Fakat 3000 ile 3500 Blaine cüruf incelikleri arasında bu etki görülmemektedir.



Şekil 8.4. Yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri

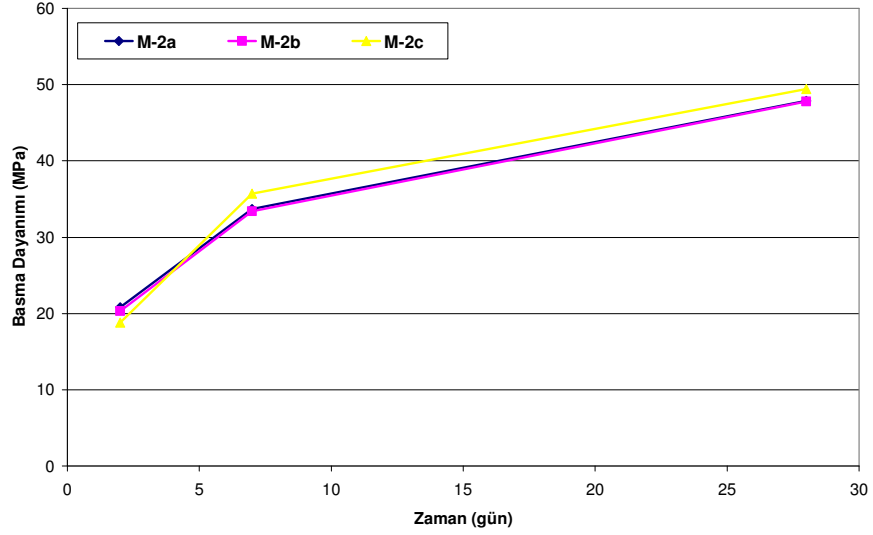
Şekil 8.5'de 3 farklı incelikteki çelikhane cürufu numunesinin, CEM-II / B-S 42,5 R tipi çimentodaki ağırlıkça %21,43'lük yüksek fırın cürufu ile bire bir yer değiştirmesi sonucunda hazırlanan karışımlara ait 2, 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri verilmektedir. Çelikhane cürufunun, yüksek fırın cürufu ile yer değiştirmesi sonucunda elde edilen karışımların 2 günlük basınç mukavemetleri standart

değerden yaklaşık %15 düşük olmakla birlikte 28 günlük basınç mukavemetleri standart değerler arasında kalmıştır. 2 günlük basınç mukavemeti değerleri erken dayanım sınıfına girmemesine rağmen normal dayanım sınıfında yer almaktadır. Bu incelik değerleri dikkate alınacak olursa, çelikhane cürufu inceliğinin mukavemet üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Düşük erken dayanım problemi Shi and Quian (2000) tarafından da belirlenmiştir. Bu sorunun önüne geçilebilmesi amacıyla, erken basma dayanımını arttırmaya yönelik olarak karışımın alümina miktarını arttırabilecek çözümler üretilmelidir. Bu kapsamda yüksek alüminalı çimento ilave katkı (ayarlayıcı) olarak kullanılmalıdır.



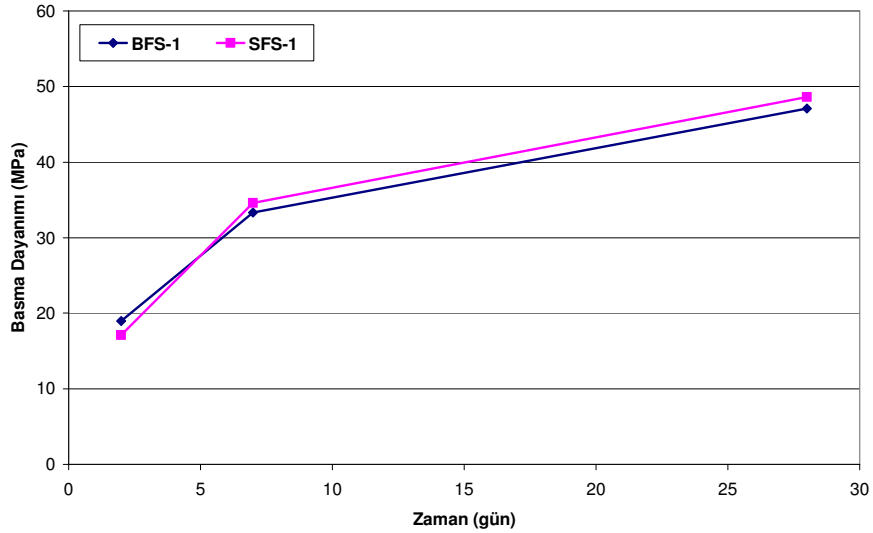
Şekil 8.5. Çelikhane cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri

Şekil 8.6'da 3500 Blaine inceliğindeki çelikhane cürufu numunesinin, CEM-II / B-S 42,5 R tipi çimentodaki ağırlıkça %21,43'lük 3500 Blaine inceliğindeki yüksek fırın cürufu ile farklı oranlarda yer değiştirmesi sonucunda hazırlanan yüksek fırın cürufu+çelikhane cürufu katkılı çimentolara ait 2, 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri verilmektedir. Şekil 8.6'dan görüldüğü gibi, bu karışımların basınç mukavemeti değerleri de standart değerleri sağlamaktadır. %5 ve %10 çelikhane cürufu içeren numuneler arasında basınç mukavemetleri arasında belirgin bir fark görülmektedir fakat bu oran %15'e çıktığında 7 ve 28 günlük mukavemetlerde az da olsa bir iyileşme görülmektedir.

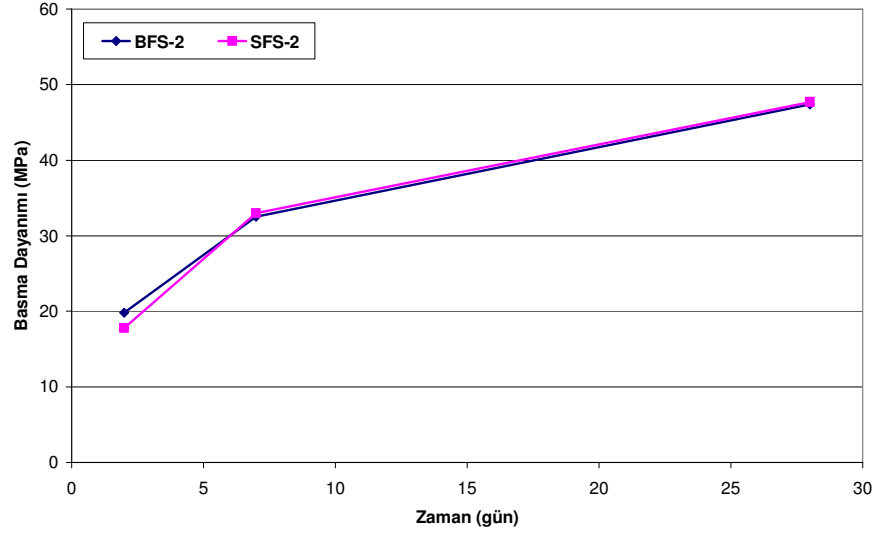


Şekil 8.6. Çelikhane cürufu+yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri

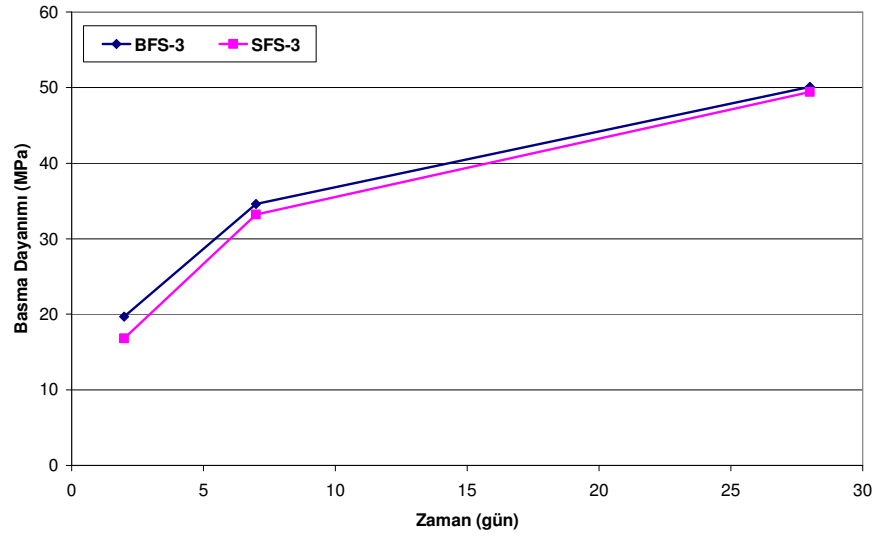
Aynı cüruf inceliğine ve aynı cüruf katkı oranına sahip numuneleri karşılaştıracak olursak; 3000, 3500 ve 4000 Blaine'lik inceliğe sahip çelikhane cürufu katkılı çimentoların basınç mukavemeti değerleri ile, aynı incelikte yüksek fırın cürufu kullanılarak hazırlanan çimentoların basınç mukavemeti değerleri arasında pek bir fark görülmemektedir (Şekil 8.7-8.9).



Şekil 8.7. Aynı katkı oranına sahip, 3000 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri



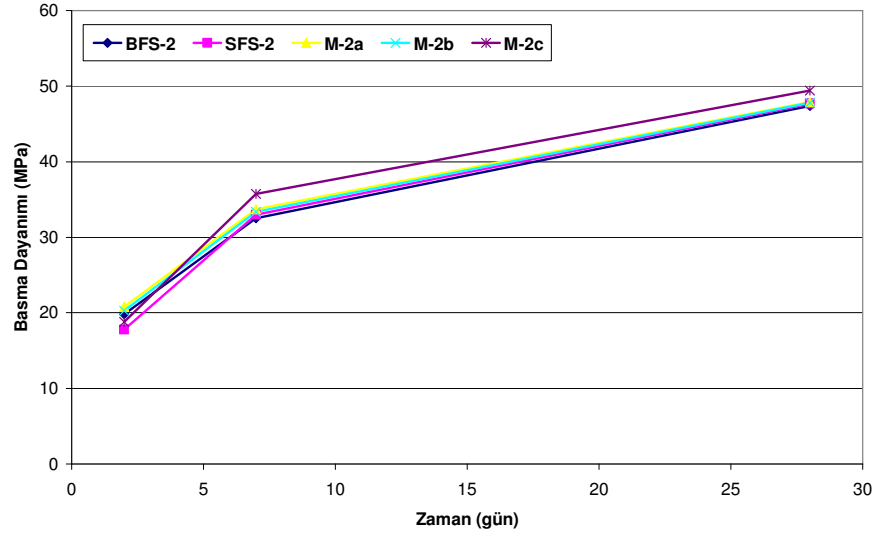
Şekil 8.8. Aynı katkı oranına sahip, 3500 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri



Şekil 8.9. Aynı katkı oranına sahip, 4000 Blaine incelikte çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların basma dayanımı değerleri

3500 Blaine değerine sahip yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu ve çelikhane cürufu+yüksek fırın cürufu katkılı çimentoları değerlendirdiğimizde ise, çelikhane cürufu ile yüksek fırın cürufunun katkı olarak birlikte veya ayrı ayrı kullanılması durumunda belirli bir orana kadar basınç mukavemetleri açısından bir fark görülmektedir. Fakat %15 oranında çelikhane cürufu ile %6,43 oranında yüksek fırın cürufu içeren çimento karışımı, bu katkılar ayrı ayrı kullanıldıklarında elde edilen çimentolara kıyasla 7 ve 28 günlük basınç mukavemetleri yüksek

olmaktadır (Şekil 8.10).



Şekil 8.10. 3500 Blaine incelikteki çelikhane cürufu, yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu+yüksek fırın cürufu katkı harçların basma dayanımı değerleri

9. YORUM ve ÖNERİLER

Çimento dayanım testlerinde, çelikhane ve de yüksek fırın cürufu numunelerinden hazırlanan katkılı çimentoların 7 ve 28 günlük basma dayanımlarının farklılık göstermediği, çelikhane cürufu katkılı çimentoların 2 günlük basınç dayanımlarının ise, literatürde yer aldığı gibi, biraz düşük olduğu fakat iyileştirmelere açık olduğu düşünülmektedir (Soğutma hızına bağlı olarak değişim göstermesi beklenen mineralojik yapı açısından bir değerlendirme yapılmamıştır). İleriye yönelik çalışmalar kapsamında, bu çalışmanın farklı soğutma yöntemleri, özellikle yüksek fırın cüruflarında kullanılan granülizasyon yöntemi, kullanılarak elde edilecek çelikhane cürufları üzerinde detaylı biçimde yapılarak çimento kalitesine etkisi incelenmelidir.

Bu çalışma kapsamında kullanılan çelikhane cürufu numunelerinin bir ön kırma gerektirdiği fakat soğutma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermesi beklenen tane boyu büyüklüğü dikkate alınarak uygun soğutma yöntemi ile bu işlemin bypass edilebileceği düşünülmektedir.

Öğütülebilirlik yönünden, çelikhane cürufunun yüksek fırın cürufundan farklılık göstermediği, bununla ilişkili olarak hali hazırda katkılı çimento üretiminde klinker ile birlikte öğütülen granüle yüksek fırın cürufuna bir alternatif olarak kullanılacak olursa öğütmedeki enerji maliyetine ekstra bir yük getirmeyeceği görülmektedir.

Kırılma parametreleri incelendiğinde ise, numunelerin kırılma dağılım fonksiyonları arasında farklılık bulunmadığı, kırılma hızının iş indeksi değerine bağlı olarak değişim gösterdiği fakat bu değişimin laboratuvar ölçekli bir değirmende pek fazla belirgin olmadığı görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, tek bir yöntemle fakat farklı hızlarda soğutulan çelikhane cürufları kullanılmıştır, diğer yöntemlerle elde edilen cüruflar için herhangi bir değerlendirme yapılamamıştır. Bu nedenle, literatürde yer alan, çelikhane cüruflarına yönelik farklı soğutma tekniklerinin de uygulanarak, çelikhane cüruflarının öğütülebilirlik ve de hidrolik bağlayıcı özelliği üzerindeki etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Çelikhane cüruflarının çimento üretiminde

kullanımında ürün kalitesini etkileyecek hususlardan bir tanesi de cürufun puzolanik aktivitesidir ve doğrudan dayanımı etkileyeceğinden üzerinde durulması gerekmektedir. Ayrıca soğutma yöntemine göre farklılık gösteren tane boyu büyüklüğü de çelikhane cüruflarının kullanılacakları proseste önem kazanmaktadır. Çimento endüstrisinde kullanılmakta olan farklı öğütme teknolojileri göz önünde bulundurulduğunda, özellikle yüksek basınçlı değirmenler, cürufların basınç altındaki davranımlarının da darbe altındaki kırılma davranımlarına ek olarak belirlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Austin, L.G., Rogers, R.S.C., 1985, Powder Technology in Industrial Size Reduction, Powder Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 91-109
- Bayraktar, İ., 1974, Öğütme Hesaplarında Bond Formülleri, Madencilik, Cilt XIII, Sayı 4, s. 11-19
- Brugan, J.M., 1992, State of the Art Raw Grinding, ZKG, No. 3, pp. 59-62
- Cordonnier, A., 1994, The Horomill – A New Finish Grinding Mill, ZKG, No. 11, pp. 643-647
- Duda, W.H., 1976, Cement Data Book 1 : International Process Engineering in the Cement Industry, Bauverlag GmbH – Wiesbaden and Berlin, 444p
- Fujimoto, S., 1993, Reducing Specific Power Usage in Cement Plants, World Cement, No. 7, pp. 25-35
- Gouda, G.R., 1981, Technical Aspects of Comminution in the Cement Industry – Part I, World Cement Technology, pp. 112-122
- Hansen, E.K., 1983, Introduction to Cement Industry, F.L. Smidth Co. Publications
- Higgins, R.A., 1983, Engineering Metallurgy – Part I, Chapman and Hall Inc., NY, 559p
- Knobloch, O., 1986, The High Pressure Grinding Roll in Open and Closed Circuit Operation Applied on Cement Clinker Results from Industry and Test Plant, 6th Europ. Symp. Comminution, Nürnberg
- Lynch, A.J., Whiten, W.J., Draper, N., 1967, Developing the Optimum Performance of a Multi-Stage Grinding Circuit, Transaction of Institute of Mining and Metallurgy, Section C : Mineral Processing and Extractive Metallurgy, pp. 169-182
- Malzig, G., Their, B., 1985, Size Reduction and Homogenizing, Congress Report of the VDZ Congress' 85
- Marshall, V.C., 1966, Crushing and Grinding – Critique of Existing Laws, Chem. and Process Eng., pp. 177-183
- Müller-Pfeiffer, M., Ellerbrock, H.G., Sprung, S., 2000, Factors Affecting the Properties of Cement with Several Main Constituents, ZKG, No. 5, pp. 241-250
- Napier-Munn, T.J., Morrell, S., Morrison, R.D., Kojovic, T., 1997, Mineral Comminution Circuits Their Operation and Optimisation, Editor: Napier-Munn, T.J., 413p.

- Öner, M., 1996, Çimento Endüstrisinde Eski Düşünceler Yeni Öğütme Teknolojilerine Dönüşüyor - Bölüm 1, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı 2, s. 25-39
- Schafer, K., 2003, Steel Production Processes in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th Edition, Vol. 34, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co., Weinheim, 727p
- Schoenert, K., Knoblach, O.R., 1984, Cement Grinding in High Pressure Grinding Roll, ZKG, No. 11, pp. 563-568
- Shi, C., 2004, Steel Slag – Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.16, No. 3, pp.230-236
- Shi, C., Qian, J., 2000, High Performance Cementing Materials from Industrial Slags – A Review, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 29, No. 3, pp. 195-207
- Stoiber, W., Trenkwalder, J., Pernkopf, H., Beigl, J., 1994, Modernization of the Cement Grinding Plant at the Kirchbichl Works of Pelmooser Zementwerke AG by Installing a MFL Pregrinding System, ZKG, No. 3, pp. 94-96
- Suk, M.O., Jo, S.K., Kim, S.H., Lee, K.Y., Park, J.M., 2006, X-Ray Observation of Phosphorus Vaporization from Steelmaking Slag and Suppression Method of Phosphorus Reversion in Liquid Iron, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 37B, No. 1, pp. 99-107
- Taşkın, C., 1984, Türkiye Çimento Hammadde Kaynakları : Rapor, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
- Türk Standartları Enstitüsü, Çimento, TS EN 197, 2002
- Voller, V.R., 1983, A Note on Energy-Size Reduction Relationships in Comminution, Powder Technology, Vol. 36, No. 2, pp. 281-286
- Walker, W.H., Lewis, W.K., McAdams, W.H., Gilliland, E.K., 1937, Principles of Chemical Engineering, McGraw Hill, NY, 254p
- William, J.K., Brugan, J.M., 1989, Osepa Update, Cement Users' Seminar, Fuller Company, Bethlehem, Pennsylvania
- Wills, B.A., 1985, Mineral Processing Technology, Pergamon Press, 630p
- Xuequan, W., Hong, Z., Xinkai, H., Husen, L., 1999, Study on Steel Slag and Fly Ash Composite Portland Cement, Cement and Concrete Research, Vol. 29, No. 7, pp. 1103-1106

EK 1. STANDART BOND İŞ İNDEKSİ TESTİ SON PERİYOT DEĞİRMEN GİRİŞ ve ÇIKIŞ TANE BOYU DAĞILIMLARI

Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufu

Karışım Oranı - %10

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	90,97	96,95
1700	81,89	93,18
1180	75,37	91,16
850	71,00	89,89
600	67,58	88,69
425	64,15	87,06
300	58,80	83,68
212	49,93	76,85
150	36,39	64,62
106	17,52	44,26
90	13,98	30,86

Karışım Oranı - %15

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	91,20	96,48
1700	81,77	92,01
1180	75,28	89,66
850	70,99	88,10
600	67,58	86,66
425	64,03	84,73
300	58,55	80,72
212	49,54	72,77
150	36,06	59,62
106	17,23	40,59
90	10,77	30,44

Karışım Oranı - %20

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	90,74	95,61
1700	79,27	90,63
1180	71,96	88,10
850	67,28	86,37
600	63,69	84,82
425	60,13	82,84
300	54,81	79,13
212	46,46	72,10
150	34,08	60,06
106	16,19	40,28
90	11,83	29,43

Karışım Oranı - %35

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	89,41	94,79
1700	77,45	87,95
1180	69,86	84,77
850	65,11	82,81
600	61,42	81,05
425	57,76	78,97
300	52,51	75,30
212	44,50	68,86
150	32,57	58,14
106	15,39	39,34
90	11,67	31,85

Karışım Oranı - %100

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	84,41	91,65
1700	68,81	81,52
1180	59,07	75,99
850	52,97	72,85
600	48,34	70,39
425	44,14	67,93
300	38,85	64,39
212	32,04	59,09
150	23,86	50,98
106	10,70	35,89
90	3,78	25,17

Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufu

Karışım Oranı - %10

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	92,75	97,89
1700	82,91	94,38
1180	76,15	92,46
850	71,71	91,18
600	68,26	89,99
425	64,86	88,32
300	59,81	84,80
212	51,42	77,80
150	38,71	65,68
106	19,75	44,95
90	8,83	30,02

Karışım Oranı - %15

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	93,65	97,98
1700	84,13	94,87
1180	77,31	93,18
850	72,81	92,34
600	69,32	91,68
425	65,85	90,60
300	60,59	87,64
212	51,65	81,02
150	39,04	68,73
106	20,07	48,20
90	11,41	32,65

Karışım Oranı - %20

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	93,84	97,42
1700	72,64	93,33
1180	66,26	91,04
850	62,16	89,60
600	59,12	88,39
425	56,30	86,85
300	52,25	83,92
212	45,94	78,18
150	35,98	67,96
106	19,56	48,33
90	10,46	32,74

Karışım Oranı - %35

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	92,13	96,51
1700	79,25	89,92
1180	70,54	86,04
850	64,88	83,61
600	60,66	81,56
425	56,54	79,15
300	50,91	75,08
212	42,88	68,13
150	31,90	57,58
106	15,25	39,49
90	7,11	30,24

Karışım Oranı - %100

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	91,70	96,12
1700	75,95	88,23
1180	66,35	83,37
850	60,30	80,51
600	55,81	78,26
425	51,97	75,93
300	47,51	72,58
212	41,92	67,62
150	34,47	59,47
106	18,43	39,59
90	3,19	18,76

Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufu

Karışım Oranı - %10

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	91,07	96,51
1700	80,85	92,39
1180	73,93	90,32
850	69,44	88,74
600	65,99	87,27
425	62,53	85,38
300	57,54	81,75
212	49,94	75,11
150	38,40	64,08
106	19,39	44,14
90	8,12	31,26

Karışım Oranı - %15

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	88,53	96,46
1700	77,60	92,74
1180	70,19	90,44
850	65,28	88,91
600	61,14	87,50
425	56,46	85,51
300	48,60	81,13
212	37,42	72,46
150	25,16	59,61
106	11,56	41,89
90	4,93	30,20

Karışım Oranı - %20

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	87,49	94,03
1700	75,65	88,10
1180	67,48	84,96
850	62,34	82,86
600	58,35	81,15
425	54,64	79,14
300	49,41	75,53
212	41,47	69,12
150	29,94	58,76
106	15,02	41,17
90	6,67	30,02

Karışım Oranı - %35

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	87,25	93,31
1700	74,56	85,65
1180	66,45	81,82
850	61,24	79,54
600	57,38	77,74
425	53,78	75,83
300	48,83	72,60
212	41,51	67,05
150	30,75	57,96
106	15,63	42,17
90	5,91	32,71

Karışım Oranı - %100

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	79,14	89,20
1700	60,34	76,84
1180	49,82	70,42
850	43,85	66,73
600	39,69	63,97
425	36,32	61,59
300	32,83	58,77
212	28,77	55,19
150	23,65	50,22
106	13,47	39,67
90	3,20	27,24

Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufu

Karışım Oranı - %10

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	93,26	97,63
1700	84,34	94,74
1180	77,93	92,90
850	73,61	91,63
600	70,17	90,36
425	66,58	88,53
300	61,22	84,78
212	52,68	77,42
150	39,67	64,75
106	21,12	44,46
90	9,98	28,72

Karışım Oranı - %15

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	92,63	97,43
1700	83,12	94,19
1180	76,20	92,13
850	71,93	90,75
600	68,52	89,42
425	65,09	87,60
300	59,95	84,04
212	51,54	77,15
150	38,94	65,26
106	19,39	43,13
90	9,86	30,87

Karışım Oranı - %20

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	92,53	97,26
1700	81,77	92,78
1180	74,61	90,19
850	69,97	88,33
600	66,21	86,60
425	62,16	84,34
300	55,78	79,98
212	45,92	71,83
150	33,04	59,13
106	15,39	39,93
90	9,28	30,43

Karışım Oranı - %35

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	90,70	96,90
1700	79,18	91,59
1180	71,25	88,50
850	66,07	86,37
600	61,82	84,33
425	57,34	81,73
300	50,49	77,01
212	40,30	68,73
150	27,54	56,46
106	12,67	38,47
90	5,99	29,76

Karışım Oranı - %100

Tane Boyu (µm)	Kümülatif % Elek Altı	
	Değ.Giriş	Değ.Çıkış
3350	100,00	100,00
2360	90,59	97,20
1700	74,94	89,88
1180	64,73	85,44
850	58,27	82,48
600	53,23	79,84
425	48,24	76,96
300	41,46	72,43
212	33,17	65,86
150	23,94	56,80
106	11,32	41,97
90	5,71	31,37

EK 2. KIRILMA DAĞILIM FONKSİYONU

Tane Boyu (mm)	Kendiliğinden Soğuyan Ç.C.	Hızlı Soğuyan Ç.C.	Yavaş Soğuyan Ç.C.	Karıştırılarak Soğutulan Ç.C.	Tane Boyu (mm)	Klinker
38,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50,00	0,00
26,87	7,03	7,03	5,41	10,65	35,36	2,00
19,00	10,56	10,56	8,94	13,21	25,00	8,67
13,44	24,15	24,13	24,24	23,95	17,68	22,03
9,50	22,04	21,59	23,01	20,82	12,50	19,21
6,72	11,12	10,83	11,70	10,17	8,84	13,01
4,75	6,94	6,94	8,07	6,09	6,25	9,01
3,36	5,52	5,61	5,99	4,75	4,42	6,34
2,38	3,29	3,42	3,30	2,95	3,13	3,84
1,68	1,68	2,21	2,00	1,71	2,21	2,97
1,19	1,94	1,95	1,66	1,59	1,56	2,58
0,840	1,07	1,07	1,02	0,69	1,10	1,97
0,594	0,94	0,94	0,91	0,68	0,781	1,61
0,420	0,76	0,76	0,73	0,57	0,552	1,24
0,297	0,60	0,61	0,59	0,45	0,391	1,04
0,210	0,48	0,48	0,47	0,36	0,276	0,85
0,148	0,38	0,38	0,38	0,28	0,195	0,69
0,105	0,30	0,30	0,31	0,22	0,138	0,56
0,074	0,24	0,24	0,25	0,18	0,098	0,45
0,052	0,19	0,19	0,20	0,14	0,069	0,36
0,037	0,15	0,15	0,16	0,11	0,049	0,30
0,026	0,12	0,12	0,13	0,09	0,035	0,24
0,019	0,10	0,10	0,10	0,07	0,024	0,19
0,013	0,08	0,08	0,08	0,06	0,017	0,16
0,009	0,06	0,06	0,07	0,04	0,012	0,13
0,007	0,05	0,05	0,05	0,04	0,009	0,10
0,005	0,04	0,04	0,04	0,03	0,006	0,08
0,003	0,03	0,03	0,04	0,02	0,004	0,07
0,002	0,02	0,02	0,03	0,02	0,003	0,05
0,0016	0,02	0,02	0,02	0,01	0,002	0,04

EK 3. KIRILMA HIZI PARAMETRESİ (r/d)

Kendiliğinden Soğuyan Çelikhane Cürufu

Tane Boyu (mm)	Kırılma Hızı (r/d*)			
	10%	15%	20%	35%
2,360	0,0635	0,0603	0,0586	0,0562
1,670	0,0834	0,0793	0,0770	0,0739
1,180	0,1092	0,1038	0,1008	0,0968
0,834	0,1328	0,1262	0,1226	0,1176
0,590	0,1322	0,1256	0,1220	0,1171
0,417	0,1035	0,0984	0,0956	0,0917
0,295	0,0661	0,0628	0,0610	0,0586
0,209	0,0357	0,0339	0,0330	0,0316
0,148	0,0170	0,0162	0,0157	0,0151
0,104	0,0075	0,0071	0,0069	0,0066
0,074	0,0031	0,0030	0,0029	0,0028
0,052	0,0013	0,0012	0,0012	0,0012
0,037	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
0,026	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
0,018	9,6E-05	9,2E-05	8,9E-05	8,5E-05
0,013	4,0E-05	3,8E-05	3,7E-05	3,6E-05
0,009	1,7E-05	1,6E-05	1,6E-05	1,5E-05
0,007	7,1E-06	6,7E-06	6,5E-06	6,3E-06
0,005	3,0E-06	2,8E-06	2,7E-06	2,6E-06
0,003	1,2E-06	1,2E-06	1,1E-06	1,1E-06
0,002	5,2E-07	4,9E-07	4,8E-07	4,6E-07

Hızlı Soğuyan Çelikhane Cürufu

Tane Boyu (mm)	Kırılma Hızı (r/d*)			
	10%	15%	20%	35%
2,360	0,0631	0,0601	0,0578	0,0551
1,670	0,0830	0,0790	0,0760	0,0725
1,180	0,1087	0,1035	0,0994	0,0949
0,834	0,1321	0,1258	0,1209	0,1154
0,590	0,1315	0,1252	0,1203	0,1148
0,417	0,1030	0,0981	0,0943	0,0899
0,295	0,0658	0,0626	0,0602	0,0574
0,209	0,0355	0,0338	0,0325	0,0310
0,148	0,0169	0,0161	0,0155	0,0148
0,104	0,0074	0,0071	0,0068	0,0065
0,074	0,0031	0,0030	0,0029	0,0027
0,052	0,0013	0,0012	0,0012	0,0011
0,037	5,5E-04	5,2E-04	5,0E-04	4,8E-04
0,026	2,3E-04	2,2E-04	2,1E-04	2,0E-04
0,018	9,6E-05	9,1E-05	8,8E-05	8,4E-05
0,013	4,0E-05	3,8E-05	3,7E-05	3,5E-05
0,009	1,7E-05	1,6E-05	1,5E-05	1,5E-05
0,007	7,0E-06	6,7E-06	6,4E-06	6,1E-06
0,005	2,9E-06	2,8E-06	2,7E-06	2,6E-06
0,003	1,2E-06	1,2E-06	1,1E-06	1,1E-06
0,002	5,2E-07	4,9E-07	4,7E-07	4,5E-07

Yavaş Soğuyan Çelikhane Cürufu

Tane Boyu (mm)	Kırılma Hızı (r/d*)			
	10%	15%	20%	35%
2,360	0,0642	0,0608	0,0594	0,0572
1,670	0,0844	0,0799	0,0781	0,0752
1,180	0,1106	0,1046	0,1023	0,0984
0,834	0,1344	0,1271	0,1243	0,1196
0,590	0,1338	0,1265	0,1237	0,1191
0,417	0,1048	0,0991	0,0969	0,0933
0,295	0,0669	0,0633	0,0619	0,0595
0,209	0,0362	0,0342	0,0334	0,0322
0,148	0,0172	0,0163	0,0159	0,0153
0,104	0,0075	0,0071	0,0070	0,0067
0,074	0,0032	0,0030	0,0029	0,0028
0,052	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012
0,037	5,6E-04	5,3E-04	5,1E-04	5,0E-04
0,026	2,3E-04	2,2E-04	2,2E-04	2,1E-04
0,018	9,8E-05	9,2E-05	9,0E-05	8,7E-05
0,013	4,1E-05	3,9E-05	3,8E-05	3,6E-05
0,009	1,7E-05	1,6E-05	1,6E-05	1,5E-05
0,007	7,2E-06	6,8E-06	6,6E-06	6,4E-06
0,005	3,0E-06	2,8E-06	2,8E-06	2,7E-06
0,003	1,3E-06	1,2E-06	1,2E-06	1,1E-06
0,002	5,3E-07	5,0E-07	4,9E-07	4,7E-07

Karıştırılarak Soğutulan Çelikhane Cürufu

Tane Boyu (mm)	Kırılma Hızı (r/d*)			
	10%	15%	20%	35%
2,360	0,0647	0,0617	0,0599	0,0576
1,670	0,0851	0,0812	0,0787	0,0757
1,180	0,1114	0,1063	0,1030	0,0991
0,834	0,1354	0,1292	0,1253	0,1205
0,590	0,1348	0,1286	0,1247	0,1199
0,417	0,1056	0,1007	0,0977	0,0939
0,295	0,0674	0,0643	0,0624	0,0600
0,209	0,0364	0,0347	0,0337	0,0324
0,148	0,0173	0,0165	0,0160	0,0154
0,104	0,0076	0,0072	0,0070	0,0068
0,074	0,0032	0,0031	0,0030	0,0028
0,052	0,0013	0,0013	0,0012	0,0012
0,037	5,6E-04	5,3E-04	5,2E-04	5,0E-04
0,026	2,3E-04	2,2E-04	2,2E-04	2,1E-04
0,018	9,8E-05	9,4E-05	9,1E-05	8,7E-05
0,013	4,1E-05	3,9E-05	3,8E-05	3,7E-05
0,009	1,7E-05	1,6E-05	1,6E-05	1,5E-05
0,007	7,2E-06	6,9E-06	6,7E-06	6,4E-06
0,005	3,0E-06	2,9E-06	2,8E-06	2,7E-06
0,003	1,3E-06	1,2E-06	1,2E-06	1,1E-06
0,002	5,3E-07	5,0E-07	4,9E-07	4,7E-07

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan DÜNDAR

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1981

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1996-1999 Gazi Anadolu Lisesi

Lisans 1999-2003 Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi:

2004 - : Araştırma Görevlisi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği
Bölümü