

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN YAPI MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

BURCU SOYSAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. EMEK MÖRÖYDOR DERUN**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN YAPI MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Burcu SOYSAL tarafından hazırlanan tez çalışması 3 Temmuz 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Saadet Kevser PABUCCUOĞLU

İstanbul Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nurcan TUĞRUL

Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca benden emeğini, ilgisini ve sabrını esirgemeyen, beni her konuda yönlendiren, iş hayatı ve öğrenim hayatı arasındaki dengeyi kurmamda destek olup anlayış gösteren tez hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN'a, desteğini, teorik ve pratik yardımlarını esirgemeyen, her türlü olanağı sağlayan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sabriye PİŞKİN'e, çalışma saatleri içerisinde, tez çalışmam için zaman ayırmamı sağlayan ve bana destek olan yöneticilerim, Sayın Kemal OK'a, Sayın Mustafa ŞAŞMAZLAR'a ve çalışma arkadaşım Sayın Ebru TUNA'ya, deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmeme olanak sağlayan Tiftik Beton İskenderun Tesisi yöneticileri ve laboratuvar sorumlusu Sayın Burhan AYDIN'a, tez çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşım Sayın Mehmet Burak ATAN'a ve emeğini, sevgisini, sabrını ve anlayışını hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda ve destek olan sevgili anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

Temmuz, 2014

Burcu SOYSAL

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....vii

KISALTMA LİSTESİ.....viii

ŞEKİL LİSTESİ.....iix

ÇİZELGE LİSTESİxi

ÖZETxiii

ABSTRACT.....xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 2

1.3 Hipotez 2

BÖLÜM 2

ÇİMENTO VE BETON 3

2.1 Çimentonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi 3

2.2 Çimento Üretim Prosesi 4

2.3 Çimento Bileşenleri 5

2.4 Çimentoların Özellikleri 6

2.4.1 Mekanik Özellikleri 6

2.4.2 Fiziksel Özellikleri..... 6

2.4.3 Kimyasal Özellikleri..... 7

2.5 Çimento Türleri 7

2.5.1 Portland Çimentosu 8

2.5.1.1 Beyaz Portland Çimentosu 8

2.5.1.2 Portland Silika Füme Çimento..... 8

2.5.1.3 Portland Kalkerli Çimento 8

2.5.1.4 Portland Kompoze Çimento 8

2.5.2	Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar	9
2.5.3	Harç Çimentosu	9
2.5.4	Uçucu Küllü Çimento	9
2.5.5	Sülfata Dayanıklı Çimento	9
2.5.6	Erken Dayanımı Yüksek Çimento	9
2.5.7	Katkılı Çimento.....	10
2.5.8	Traslı Çimento.....	10
2.5.9	Süper Sülfat Çimentosu	10
2.6	Betonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi	10
2.7	Betonu Oluşturan Malzemeler	11
2.7.1	Agrega.....	11
2.7.1.1	Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	12
2.7.1.2	Agregaların Mekanik Özellikleri	14
2.7.2	Çimento	15
2.7.3	Su	15
2.7.4	Mineral Katkılar	17
2.7.4.1	Uçucu Kül	17
2.7.4.2	Silis Dumanı	20
2.7.5	Kimyasal Katkılar.....	21
2.7.6	Renk Katkıları	23
2.8	Taze Betonun Özellikleri	23
2.8.1	İşlenebilirlik ve Kıvam	24
2.8.2	Birim Ağırlık	26
2.8.3	Betonda Segregasyon (Tanelerin Ayrışması)	26
2.8.4	Betonun Terlemesi	27
2.9	Sertleşmiş Betonun Özellikleri	27
2.9.1	Betonun Dayanımı	27
2.9.1.1	Basma Dayanımı.....	28
2.9.1.2	Çekme Dayanımı	29
2.9.2	Betonun Durabilitesi (Dayanıklılığı)	29
2.9.2.1	Betonda Çiçeklenme	30
2.9.2.2	Sülfat Etkisi	31
2.9.2.3	Deniz Suyu Etkisi	32
2.9.2.4	Asit Etkisi	33
2.9.2.5	Karbonatlaşma	33
2.9.2.6	Beton Yüzeyinin Pullanması	34
2.9.3	Geçirimlilik	34
2.9.4	Su Emme	36
2.9.5	Sünme	36
2.9.6	Büzülme (Rötre).....	36

BÖLÜM 3

CÜRUF	38
3.1 Yüksek Fırın Cürufu	39
3.1.1 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	39
3.1.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Üretimi.....	40

3.1.3	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Çimento ve Beton	
	Üretiminde Kullanılması ve Betonun Özelliklerine Etkisi	42
3.1.4	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu	42
3.2	Çelikhane Cürufu.....	43
3.2.1	Çelikhane Cürufunun Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri ...	45
3.2.2	Çelikhane Cürufunun Değerlendirilmesi	46
BÖLÜM 4		
DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR.....		48
4.1	Bazık Oksijen Fırını Çelik Cürufunun Hidratasyon Özellikleri.....	48
4.2	Çelik Cürufunun Portland Çimentosu Klinkeri Üretiminde Kullanılması ..	50
4.3	Demir-Çelik Cürufu ve Kireç Taşından Portland Çimentosu Üretimi	55
4.4	Çelikhane Cürufu ile Harmanlanmış Çimentoların Hidratasyonu ve	
	Özellikleri	59
BÖLÜM 5		
ÇELİKHANE CÜRUFUNUN GERİ KAZANIMI.....		65
BÖLÜM 6		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		71
6.1	Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği	72
6.2	Toplam Kükürt İçeriği.....	73
6.3	Suda Çözünebilir Klorür İçeriği.....	75
6.4	Humus İçeriği	77
6.5	Hafif Kirleticici Miktarı Tayini	78
6.6	Tane Büyüklüğü Dağılımı (Granülometri, Elek Analizi)	80
6.7	XRF ve XRD Deneyleri	83
BÖLÜM 7		
BETON ÜRETİMİ		88
7.1	Kullanılan Malzemeler	88
7.1.1	Çimento	88
7.1.2	Agrega.....	89
7.1.3	Uçucu Kül.....	90
7.1.4	Karma Suyu	91
7.2	Beton Dizaynı ve Karışım Oranları	91
7.3	Beton Basma Dayanımları.....	93
BÖLÜM 8		
SONUÇ VE ÖNERİLER		101
KAYNAKLAR.....		104
ÖZGEÇMİŞ.....		108

SİMGE LİSTESİ

A	Baziklik
C	Derişim
m_{LPC}	Agregadaki hafif taneciklerin yüzdesi
V	Hacim
W	Su/agrega oranı
W_n	Buharlaşamayan su içeriği

KISALTMA LİSTESİ

AR	Alümina Oranı
ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	Deneyisel Malzemeler İçin Amerikan Standardı
AT	Alçı Taşı
BOF	Bazık Oksijen Fırını
ÇC	Çelikhane Cürufu
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
EYÇ	Erken Dayanımı Yüksek Çimento
FPC	Akış Orantılı Sayıcı
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
HÇ	Harç Çimentosu
KÇ	Katkılı Çimento
KK	Kızdırma Kaybı
L	Kalker
LD	Linz Donawitz
LL	Kireçtaşı
LSF	Kireç Doygunluk Faktörü
ÖGYFC	Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu
PLÇ	Portland Kalkerli Çimento
PLK	Portland Çimento
PSFÇ	Portland Silika Füme Çimento
SC	Sintilasyon Sayıcı
SDÇ	Sülfata Dayanıklı Çimento
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SR	Silika Oranı
SSÇ	Süper Sülfat Çimentosu
TÇ	Traslı Çimento
TGA	Termal Gravimetrik Analiz
UKÇ	Uçucu Küllü Çimento
XRD	X-Işını Difraktometresi
XRF	X-Işını Flurosans Spektrometresi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Çimento üretim prosesi..... 4
Şekil 2.2	Agrega-su ilişkisi 13
Şekil 2.3	Uçucu kül SEM görüntüsü (×2000)..... 19
Şekil 2.4	Çimento aralarındaki boşlukları dolduran uçucu kül 20
Şekil 2.5	Silis dumanının SEM görüntüsü..... 21
Şekil 2.6	Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş beton eleman 31
Şekil 3.1	Granülasyon yöntemi 41
Şekil 3.2	Peletleme yöntemi 41
Şekil 3.3	Yüksek fırın ve çelikhane cürufalarının Portland çimentosuyla karıştırılan bileşimleri 47
Şekil 4.1	Çelik cürufunun X-ışını kırınımı 48
Şekil 4.2	Farklı parçacık boyutuna sahip çelik cürufu numunelerinin hidratasyonu.. esnasında meydana gelen ısı değişimleri 49
Şekil 4.3	Kullanılan çelik cürufunun X-ışını kırınımı 51
Şekil 4.4	Çelik cürufu içeren ve içermeyen Portland çimentolarının XRD analizi.. 53
Şekil 4.5	Çimento numunelerinin basma dayanımları..... 54
Şekil 4.6	Çimentoların basma dayanımları 61
Şekil 4.7	Yaşlandırma süresine ve kullanılan cüruf miktarına bağlı..... olarak çimento numunelerinin relatif dayanımları 62
Şekil 4.8	TG diyagramları 63
Şekil 5.1	Çelikhane proses akış şeması 65
Şekil 5.2	Cüruf manipülasyonu 67
Şekil 5.3	Yatay eleğin yandan görünüşü (+55 mm) 67
Şekil 5.4	Demir dışı cüruf (+55 mm üstü) 68
Şekil 5.5	Kalın seperatör 68
Şekil 5.6	+23 mm ve +11 mm elek 69
Şekil 5.7	Atık cüruf (-11 mm) 69
Şekil 5.8	+11mm-23 mm arası cüruf..... 70
Şekil 5.9	İnce separator (+23 mm)..... 70
Şekil 6.1	Deneyde kullanılan kül fırını..... 74
Şekil 6.2	Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=16$ mm..... 80
Şekil 6.3	Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=31,5$ mm..... 81
Şekil 6.4	İSDEMİR çelikhane cürufu granülasyon eğrisi..... 83

Şekil 6.5	ARL 9800 XP-161 X-Ray spektrometresi.....	84
Şekil 6.6	Kimyasal analiz işlem adımları.....	84
Şekil 6.7	Preslenerek tablet haline getirilmiş çelikhane cüruf numunesi.....	85
Şekil 6.8	Philips Panalytical X-Pert Pro XRD cihazı.....	86
Şekil 6.9	Çelikhane cürufu numunesinin XRD analiz sonucu	86
Şekil 7.1	Beton üretiminde kullanılan agreganın granülasyon eğrisi	90
Şekil 7.2	Beton üretiminde kullanılan davul mikser	93
Şekil 7.3	Küp kalıba yerleştirilmiş beton numuneleri	93
Şekil 7.4	Beton numunelerinin bekletildiği $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de ayarlı kür havuzu	93
Şekil 7.5	Beton pres makinası	94
Şekil 7.6	1 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği	95
Şekil 7.7	1 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği	95
Şekil 7.8	2 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği	96
Şekil 7.9	2 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği	97
Şekil 7.10	3 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği	98
Şekil 7.11	3 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği	98
Şekil 7.12	4 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği	99
Şekil 7.13	4 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği	100

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Çimentoların karakteristik değerlerle verilen mekanik özellikleri 6
Çizelge 2.2	Çimentoların fiziksel özellikleri..... 7
Çizelge 2.3	Portland çimentosunun kimyasal ve mineralojik bileşimi 7
Çizelge 2.4	Karma suyu kabul şartları..... 16
Çizelge 2.5	Karma suyu en yüksek klor içeriği 16
Çizelge 2.6	Kirlenme için sınır değerler 17
Çizelge 2.7	Farklı kömür türlerinden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimi .. 18
Çizelge 2.8	Beton kıvam sınıfları..... 26
Çizelge 2.9	Beton sınıfları 29
Çizelge 3.1	Çelik işletmelerinde meydana çıkan katı ve sıvı atık türleri..... 38
Çizelge 3.2	Yüksek fırın cürufu, klinker ve Portland çimentosunun kimyasal ve mineralojik bileşimi 40
Çizelge 3.3	Çelikhane cürufunda bulunan temel fazlar 46
Çizelge 4.1	Çelik cürufunun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) 49
Çizelge 4.2	Portland çimentosu klinkeri üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri 52
Çizelge 4.3	Portland çimentosu klinkeri üretiminde kullanılan hammadde karışımlarının bileşimi 52
Çizelge 4.4	Çimento numunelerinin fiziksel özellikleri 53
Çizelge 4.5	Yüksek fırın cürufu numunelerinin analizi..... 55
Çizelge 4.6	Farklı uç kaynaktan elde edilen ve çalışmalarda kullanılan yüksek fırın..... cürufunun analizi (ağırlıkça %) 56
Çizelge 4.7	Manyetik ayırma yapılmış çelikhane cürufunun analizi (ağırlıkça %) 56
Çizelge 4.8	Kireç Taşı analizleri 56
Çizelge 4.9	Altı farklı karışımın bileşimi ve analizi 57
Çizelge 4.10	Üretilen çimentoların fiziksel özellikleri ve X-ışını kırınımı ile yapılan yarı nicel faz analizi 58
Çizelge 4.11	Analiz edilen çimentoların bileşimleri ve özellikleri..... 59
Çizelge 4.12	Çelik cürufu ve çimentonun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri 60
Çizelge 4.13	İncelenen çimentoların fiziksel özellikleri 61
Çizelge 6.1	İskenderun Demir Çelik Fabrikası çelikhane cürufu elek analizi sonucu 82
Çizelge 6.2	Çelikhane cürufu XRF analizi sonuçları (ağırlıkça %) 85
Çizelge 7.1	Beton üretiminde kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları 88
Çizelge 7.2	Beton üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel analiz sonuçları 89

Çizelge 7.3	Beton üretiminde kullanılan agreganın elek analizi sonuçları	89
Çizelge 7.4	Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları	90
Çizelge 7.5	Uçucu kül fiziksel analiz sonuçları	90
Çizelge 7.6	Beton karma suyu analiz sonuçları.....	91
Çizelge 7.7	C25 beton üretimi için kullanılan 1 nolu beton dizaynı (1 m ³ için)	92
Çizelge 7.8	C30 beton üretimi için kullanılan 2 nolu beton dizaynı (1 m ³ için)	92
Çizelge 7.9	C25 beton dizaynına çelikhane cürufu eklenerek üretilen	
	3 nolu beton dizaynı (1 m ³ için).....	92
Çizelge 7.10	C30 beton dizaynına çelikhane cürufu eklenerek üretilen	
	4 nolu beton dizaynı (1 m ³ için).....	92
Çizelge 7.11	1 numaralı beton numunesi (C25) basma dayanımı sonuçları	94
Çizelge 7.12	2 numaralı beton numunesi (C30) basma dayanımı sonuçları	96
Çizelge 7.13	3 numaralı beton numunesi (C25 cürufu) basma dayanımı sonuçları ...	97
Çizelge 7.14	4 numaralı beton numunesi (C30 cürufu) basma dayanımı sonuçları ...	99
Çizelge 8.1	Elde edilen sonuçlar ve referans değerlerin karşılaştırılması	102

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN YAPI MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Burcu SOYSAL

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

Sanayi devrimi ile birlikte endüstri gelişmeye başlamış ve sonucunda oluşan atıklar gün geçtikçe çevre ve insan sağlığı bakımından tehlikeli hale gelmeye başlamıştır. Bu nedenle oluşan atıkların geri kazanımı günümüzde büyük önem taşımaktadır.

Demir ve çelik endüstrilerinde oluşan cüruf atığının bir bölümü kırma ve eleme ünitelerinden geçirilip işlenebilirliği sağlandıktan sonra bileşimindeki minerallerden kaynaklanan puzolanik özelliği sayesinde çimentoda katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Özellikle çelikhane cürufları olmak üzere, oluşan cüruf atıklarının büyük bir bölümüne puzolanik özellik kazandırılmamaktadır ve cüruf ürünleri atık sahalarında depolanmaktadır.

Bu çalışmada İSDEMİR A.Ş’de demir çelik üretimi esnasında oluşan çelikhane cürufunun yapı malzemesi olarak kullanımı incelenmiştir. Bu amaçla cüruf numunelerinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğine dair ilgili standart ve mevzuatlara uygun olarak deneyler yapılmıştır.

Cüruf numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla elek analizi deneyi, cüruf numunelerinin kimyasal özelliklerini incelemek için asitte çözünabilir sülfat içeriği, suda çözünabilir klorür içeriği, toplam kükürt içeriği, humus içeriği, hafif kirletici miktarı içeriği deneyleri ile birlikte XRF ve XRD analizleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre cüruf numunelerinin yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir.

Çelikhane cürufu kullanılarak C25 ve C30 sınıfı beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen betonların 3, 7 ve 28 günlük basma dayanımı sonuçları, doğal kırma taş ve uçucu kül kullanılarak üretilen beton numunelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cüruf, çelikhane cürufu, agrega, atık değerlendirme, beton üretimi.

ABSTRACT

THE UTILIZATION OF STEEL SLAG AS CONSTRUCTION MATERIAL

Burcu SOYSAL

Department of Chemical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Emek MÖRÖYDOR DERUN

With the industrial revolution, the industry has began to develop fastly and wastes have began to be dangerous for the environment and human health. For this reason, the recycling of wastes is very important today.

In the iron and steel industries, a part of waste slag is used as additives in cement production after passed from crushing and screening units. However, a great amount of waste slags, especially steel slag, are not appropriate for using as aggregate because of its chemical and mineralogical composition, hence they are stored in waste store fields.

In this project, the usage of slag wastes as construction material, that are formed during iron and steel productions at İSDEMİR A.Ş., was studied. For this purpose, the required tests, for the usability of steel slags, have been accomplished according to the standard test methods.

For determining particle size, distribution test was accomplished. Also, to examine the chemical properties of steel slags, acid soluble sulfates, water soluble chlorides, total sulphur content, humus content, lightweight contaminants tests and XRF and XRD analysis were accomplished. According to the results of all experiments, the usage of steel slags as construction material was examined.

Steel slag was used to produce C25 and C30 class concrete. 3, 7 and 28 days compressive strength results of produced concrete were compared with the results of reference concrete produced with natural coarse aggregate and fly ash.

Key words: Slag, steel slag, aggregate, waste utilization, concrete production.

1.1 Literatür Özeti

Entegre çelik işletmelerinde çelik üretimi sırasında hammadde, hava, su, yakıt ve enerji gibi temelde beş girdi kullanılmaktadır. Yaklaşık olarak toplam ton çelik üretiminin %10'u cüruf olarak ortaya çıkmaktadır. Metalurjik cüruflar, yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu, fosfor cürufu, bakır cürufu ve pota cürufudur. Kimyasal ve mineralojik bileşimlerine bağlı olarak çimentolaştırıcı ve/veya puzolanik özelliğe sahip olabilirler. Günümüzde metalurjik cürufların birçoğu farklı uygulamalarda agrega olarak kullanılmaktadır.

ASTM Standart Enstitüsü çelikhane cürufunu, temel oksijen fırınında veya elektrik ark ocağında çelik üretimi ile eş zamanlı olarak eriyik halde elde edilen ve temel olarak demir, alüminyum, mangan, kalsiyum ve magnezyumun oksitleri ile birleşmiş halde kalsiyum silikatlar ve ferritlerden oluşan ve metalik olmayan bir ürün olarak tanımlar.

Fiziksel olarak çelikhane cürufları, koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüme sahiptirler. Yüksek fırın cürufuna kıyasla çok sert ve dayanıklıdır. Özgül ağırlıkları ise %20-%25 daha büyüktür.

Çelik cürufunun kimyasal bileşimi %45-60 CaO, %10-15 SiO₂, %1-5 Al₂O₃, %3-9 Fe₂O₃, %3-13 MgO, %7-20 FeO şeklindedir. Kimyasal bileşim, çelik cürufunun hidratasyon aktivitesini belirlemek için çok önemli bir parametredir. Baziklik, $A = \text{CaO} / (\text{SiO}_2 + \text{P}_2\text{O}_5)$ çelik cürufunun hidratasyon aktivitesini belirlemek amacıyla kullanılabilir. Bazikliklerine göre çelik cürufları 4 farklı gruba ayrılmıştır; olivin grup ($A=0,9-1,4$), mervinit grup

($A=1,4-1,6$), dikalsiyum silikat grup ($A=1,6-2,4$) ve trikalsiyum silikat grup ($A>2,4$). Bunlar arasında sadece $A>1,8$ olan cüruflar çimento malzemesi olarak kullanılabilir.

Bazik oksijen fırını çelik cürufunun mineral yapısında olivin, mervinit, dikalsiyum silikat (C_2S), trikalsiyum silikat (C_3S), tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF), dikalsiyum ferrit (C_2F), $CaO-FeO-MnO-MgO$ katı çözeltisi (RO fazı) ve serbest CaO bulunur.

Çelikhane cüruflarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan bilimsel araştırmalar sonucunda çelikhane cüruflarının özellikle karayollarında ve demiryollarında, çimento sanayinde, tarımda ve cüruf yünü imalatında, konvansiyonel malzemelerin yerine kullanılabildiği ortaya çıkmıştır. Çelikhane cürufları sert yapıları nedeniyle yolların taban ve alt taban uygulamaları için uygundur. Çelikhane cürufunun mineralojik ve fiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalar çelikhane cürufunun iyi bir yol malzemesi olduğunu ispatlamıştır. Ayrıca, çelikhane cürufu demir yolu raylarında balast malzemesi olarak da kullanılabilir.

1.2 Tezin Amacı

Yapılan çalışmanın amacı çelik üretimi sırasında ortaya çıkan cürufun yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılmasıdır.

1.3 Hipotez

Çelikhane cürufu çeşitli alanlarda yapı malzemesi olarak kullanılmakla birlikte beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmasıyla ilgili çeşitli kısıtlar bulunmaktadır. Ancak; çelikhane cürufunun yapısında C_2S , C_3S , C_4AF ve C_2F fazlarının bulunması çelik cürufunun çimentolaşma özelliklerini destekler. Çelikhane cürufu beton içerisinde belirli oranlarda agrega olarak kullanılabilir.

ÇİMENTO VE BETON

Çimento, yapı malzemelerinin temelini oluşturup, betonun ana maddesi olarak kullanılmaktadır. Keşfi 19. yüzyıla kadar dayanmaktadır ve günümüzde de çimento ve betonun gelişimi ve özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışmalar devam etmektedir.

2.1 Çimentonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır [1]. Çimento, sertleştikten sonra suya karşı dayanıklı olup esas kısmı silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksitlerin bileşiklerinden meydana gelerek dayanım ve hacim sabitliği bakımından belirtilmiş normlara uygun değerlerdedir [2].

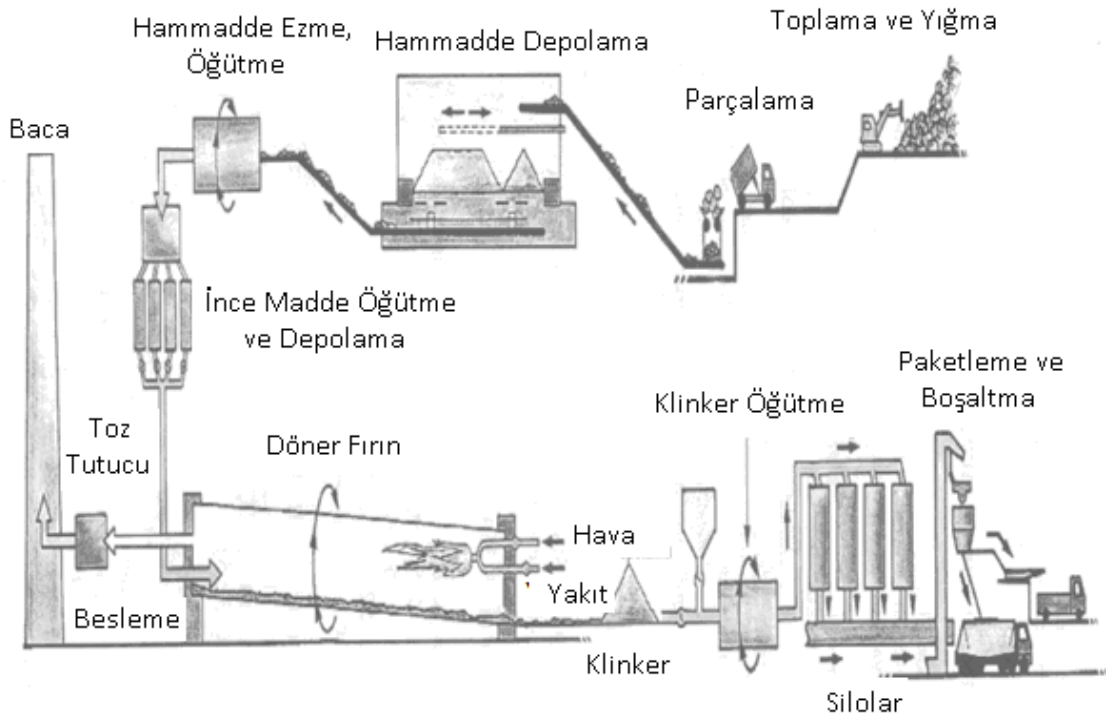
Çimentolar su ile reaksiyonu sonucunda hem havada hem de suda katılırlar. Çimento ile su arasında meydana gelen kimyasal reaksiyona “hidrasyon” denir.

1824 yılında, İngiltere’nin Leeds kentinde Joseph Aspdin isimli bir duvar ustası, hazırladığı ince taneli kalker ve kil karışımını pişirdikten sonra öğütterek çimento üretmiştir. Üretilen çimentonun rengi ve diğer özellikleri, Leeds kentine yakın olan Portland isimli küçük bir adadan getirilen doğal yapı taşına benzediği için adına Portland Çimentosu denmiştir [3]. Joseph Aspdin’in yapmış olduğu Portland çimentosu yeterli sıcaklıkta pişirilemediği için bazı eksiklikler ortaya çıkmıştır. 1845 yılında, Isaac

Johnson isimli bir İngiliz, iyi bir pişirme gerçekleştirerek Portland çimentosunun özelliklerini geliştirmiştir.

2.2 Çimento Üretim Prosesi

Çimento üretiminde kullanılan ana maddeler kalker ve kildir. Çeşitli kazı ve yükleme sistemleri ile üretilen kalker, marn, kil, demir cevheri gibi hammaddeler kırıcıdan geçirilerek tane büyüklükleri 0-30 mm'ye kadar getirilir ve sonrasında değirmende öğütülür. Değirmenden çıkan malzemede ortalama %1 oranında rutubet olmalıdır. Değirmenden çıkan malzemeye farin adı verilir. Farin, klinker oluşturmak amacıyla fırına gönderilir. Döner fırına bir ucundan yakıt ve hava diğer ucundan pişirilecek olan farin verilir. Fırın içine giren farin yavaş yavaş pişerek sıcaklığın yaklaşık 1400°C olduğu bölgede sinterlenir. Fırından çıkan gri renkteki fındık veya ceviz büyüklüğündeki malzemeye "klinker" denir. Fırından alınan klinker 100°C'ye kadar soğutulur. Öğütme işlemi sırasında öğütülecek olan çimentonun türüne göre içerisine belli oranlarda alçı, tras, kalker ve uçucu kül gibi ilave malzemeler katılarak değirmenlerde öğütülerek paketlenir [4].



Şekil 2.1 Çimento üretim süreci [5]

2.3 Çimento Bileşenleri

TS EN 197-1’de belirtilen çimento bileşenleri ve özellikleri şu şekildedir:

- Ana bileşenler

Portland çimentosu klinkeri; kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikatlardan ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ve $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) ve geri kalanı alüminyum ve demir içeren klinker fazları ile diğer bileşiklerden oluşan hidrolik bir maddedir.

Granüle yüksek fırın cürufu; demir cevheri yüksek fırında ergitilirken elde edilen uygun bileşimdeki ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilir. 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) içerir.

Puzolanik maddeler; silisli, alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Örnek olarak uçucu kül ve silis dumanı verilebilir.

Kalker (Kireç taşı) (L, LL); kalsiyum karbonat (CaCO_3) içeriği en az %75 olan bir maddedir.

- Minör ilave bileşenler

İnorganik doğal mineral maddeler, klinker üretim prosesinden çıkan inorganik mineral maddeler veya çimentoda ana bileşen olarak kullanılmayan özel olarak seçilmiş maddelerdir. İnert hafif hidrolik, gizli hidrolik veya puzolanik özelliklere sahip olabilirler. Tanecik boyutu dağılımlarından dolayı çimentonun fiziksel özelliklerini (işlenebilirlik, su tutma) iyileştirirler.

- Priz ayarlayıcı

Çimentonun su ile birleştiği zaman ile çimento hamurunun katılaşarak plastik özelliğini kaybettiği zaman arasındaki süreye “priz süresi” denir. Priz ayarlayıcılar, çimentonun diğer bileşenlerine priz kontrol edici olarak verilen maddelerdir (örneğin CaSO_4).

- Kimyasal katkılar

Çimentonun imalatını veya özelliklerini geliştirmek için ilave edilen bileşenlerdir. Kimyasal katkılar çimentonun ve çimentodan hazırlanan harç ve betonların özelliklerini

bozmamalıdır. Renk pigmentleri, hava sürükleyiciler kimyasal katkılara örnek olarak verilebilir.

2.4 Çimentoların Özellikleri

TS EN 197-1’de çimentoların özellikleri mekanik, fiziksel, kimyasal özellikler olarak farklı alt başlıklar altında açıklanmıştır.

2.4.1 Mekanik Özellikleri

Çimentonun standart dayanımı EN 196-1’e göre tayin edilen 28 günlük basma dayanımıdır. Çimentonun erken dayanımı ise EN 196-1’e göre tayin edilen 2 veya 7 günlük basma dayanımıdır.

Çizelge 2.1 Çimentoların karakteristik değerlerle verilen mekanik özellikleri [1]

Dayanım Sınıfı	Basma Dayanımı (MPa)			
	Erken Dayanım		Standart Dayanım	
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük	
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≥52,5
32,5 R	≥10,0	-		
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≥62,5
42,5 R	≥20,0	-		
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	≥ -
52,5 R	≥30,0	-		

2.4.2 Fiziksel Özellikleri

Çimentonun en önemli fiziksel özellikleri priz başlama süresi ve genleşme miktarı olarak sıralanabilir. EN 196-3’de dayanım sınıflarına göre standart değerler tayin edilmiştir.

Çizelge 2.2 Çimentoların fiziksel özellikleri [1]

Dayanım Sınıfı	Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
32,5	≥75	≤10
42,5	≥60	
52,5	≥45	

2.4.3 Kimyasal Özellikleri

Çimentonun kalitesi, çimentonun fiziksel ve daha çok kimyasal özelliklerine bağlıdır. Kil temel olarak üç tane oksit bileşiği içerir: SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 . Yanma sırasında kireç taşı CaO ve CO_2 'ye ayrışır. CO_2 ortamdan uzaklaşır, CaO ise reaksiyona girerek alit ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), belit ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), selit ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve tetrakalsiyum alüminaferrit ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) bileşiklerini oluşturur. Bu bileşikler sırasıyla C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF şeklinde gösterilir [6].

Çizelge 2.3 Portland çimentosunun kimyasal ve mineralojik bileşimi [7]

Kızdırma Kaybı	%1,38
Çözünmeyen Kalıntı	%1,18
SiO_2	%20,91
CaO	%62,18
Al_2O_3	%5,82
Fe_2O_3	%3,40
MgO	%2,36
SO_3	%2,78
Mineralojik Bileşim	C_3S , %42-46; C_2S , %25-27; C_3A , %6-10; C_4AF , %5-10

2.5 Çimento Türleri

Temel olarak silisyum, kalsiyum, alüminyum ve demir oksit içeren klinkerin değişik katkı maddeleri ile farklı oranlarda karıştırılıp öğütülmesi ile farklı türlerde çimentolar

elde edilmektedir. Çimento türleri için standartlar geliştirilmiş ve çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır.

2.5.1 Portland Çimentosu

Portland çimentosu, klinkerle bir miktar alçı taşının karıştırılıp pişirilmesinden sonra elde edilen puzolanik maddedir. Betonarme yapılarda kullanımı en yaygın olan çimento türüdür [8].

2.5.1.1 Beyaz Portland Çimentosu

Özel nitelikli kireç taşı ve klinkerin karıştırılmasıyla ortaya çıkan beyaz renkli klinkerin bir miktar alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile birlikte öğütülmesiyle elde edilen, beyaz renkli hidrolik bir bağlayıcıdır. Normal portland çimentosu ile arasındaki temel fark demir miktarının düşük olması nedeniyle C_4AF miktarının da düşük olmasıdır. Bu faz renkli bir fazdır ve çimentoya karakteristik gri rengini bu faz verir. Bu faz ne kadar fazla ise çimentonun rengi de o oranda gri olmaktadır [2].

2.5.1.2 Portland Silika Füme Çimento

Klinkerle kütlece en fazla %10 oranında silika füme ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre PSFÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.1.3 Portland Kalkerli Çimento

Klinker, kalker ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İçerdikleri kalker miktarına göre iki sınıfa ayrılırlar. Kütlece %6-%20 arasında kalker içerenler A sınıfı, kütlece %21-%35 arasında kalker içerenler B sınıfıdır. 28 günlük basma dayanımlarına göre PLÇ 32,5, PLÇ 32,5 R, PLÇ 42,5, PLÇ 42,5 R, PLÇ 52,5, PLÇ 52,5 R olmak üzere altı tiptir [9].

2.5.1.4 Portland Kompoze Çimento

Klinkerle, puzolanik veya hidrolik maddelerin ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. İçerdikleri toplam katkı maddesinin miktarına

göre iki sınıfa ayrılırlar. Kütlege %6-%20 arasında kalker içerenler A sınıfı, kütlege %21-%35 arasında kalker içerenler B sınıfıdır. 28 günlük basma dayanımlarına göre PLÇ 32,5, PLÇ 32,5 R, PLÇ 42,5, PLÇ 42,5 R, PLÇ 52,5, PLÇ 52,5 R olmak üzere altı tiptir [9].

2.5.2 Yüksek Fırın Cürufu Çimentolar

Granüle yüksek fırın cürufu ile portland çimentosu klinkeri karışımının küçük bir miktar alçı taşı ile birlikte öğütülmesi sonucu yüksek fırın cürufu çimentolar elde edilir. Granüle yüksek fırın cürufu, yüksek fırında demir cevherinin işlenmesi sırasında ortaya çıkan, ana bileşeni alüminyum ve kalsiyum silikatlar olan ve ani olarak soğutulma sonucunda puzolanik aktivite kazanarak granüle hale gelen bir malzemedir [2].

2.5.3 Harç Çimentosu

Harç çimentosu, en fazla %60 oranında puzolanik madde içeren çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre HÇ 16 olmak üzere tek bir sınıftır [9]. İçerdiği puzolan madde miktarı fazla olduğu için harç çimentosunun priz alma süresi portland çimentosuna, katkılı çimentoya ve traslı çimentoya göre daha uzundur.

2.5.4 Uçucu Küllü Çimento

Uçucu küllü çimento, klinkerle kütlege %10-%30 arasında uçucu külün az miktarda alçı taşı ile birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre UKÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.5 Sülfata Dayanıklı Çimento

C₃A miktarı en fazla %5 olan ve C₄AF ve C₃A miktarı toplamı en fazla %25 olan klinkerle az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre SDÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.6 Erken Dayanımı Yüksek Çimento

Özel olarak üretilmiş klinker ile az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen erken dayanımı yüksek bir çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre EYÇ 52,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.7 Katkılı Çimento

Klinker, az miktarda alçı taşı ve en fazla %19 oranında puzolanik maddenin birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre KÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.8 Traslı Çimento

Klinkerle %20-%40 oranında trasın ve az miktarda alçı taşının birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre TÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.5.9 Süper Sülfat Çimentosu

Kütlece en az %65 oranında yüksek fırın cürufu ile kalsiyum sülfat ve az miktarda portland çimento klinkeri veya çimentosunun birlikte öğütülmesi ile elde edilen çimentodur. 28 günlük basma dayanımına göre SSÇ 32,5 olmak üzere tek tiptir [9].

2.6 Betonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı maddesinden oluşan, oranları belirli esaslara göre ayarlanmış bir karışımı, istenen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirilerek, uygun bakım koşulları altında sertleştirme yolu ile elde edilen kompozit bir malzemedir [10].

Çimentonun su ile birleşmesinden oluşan çimento hamuru, agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak ve taneler arasındaki boşlukları doldurarak bağlayıcılık görevini yapar. Agrega ise, betonun iskeletini oluşturan kum, çakıl, kırma taş gibi taneli mineral malzemedir [11].

Çimento hamuru başlangıçta plastik bir malzeme iken çimento ve su arasında hemen başlayan kimyasal reaksiyonların etkisi ile çimento hamurunun başlangıçtaki plastik özelliği zamanla azalmaktadır. Bir veya birkaç saat sonra içerisindeki çimento hamuru katılaşmakta ve daha sonra tamamen sertleşmiş duruma gelmektedir. Başlangıçtaki plastik kıvamlı beton istenilen şekildeki kalıplara yerleştirilir ve istenilen boyutta sert yapı malzemesi elde edilir [12].

Beton ve harçların yapı malzemesi olarak kullanımı çok eski tarihlere dayanmaktadır. Tarihte ilk harç uygulamalarında bağlayıcı malzeme olarak kil kullanılmıştır. Bilindiği gibi kerpiç; balçık, kil gibi bağlayıcı malzeme kullanılarak yapılan ilk yapı malzemelerindendir ve dünyanın pek çok yöresinde, ülkemizde de halen kullanılan bir yapı malzemesidir. Daha sonra, alçı, kireç gibi bağlayıcıların üretilmesiyle, Eski Mısır'da alçının, Eski Roma'da kireç ve puzolanların, daha sonraları Avrupa'da grapye ve su kirecinin harç yapımında kullanıldığı görülmektedir. Yüzyıllar boyunca Anadolu ve çevresinde kullanılan Horasan harcı da kireç esaslı taneli bir kompozit malzemedir. Betonun tarihi Eski Roma Dönemi'ne kadar gider. Romalılar, kireç ve volkanik küller kullanılarak elde ettikleri, havada ve suda katılaşma özelliğine sahip olan su kireci (hidrolik kireç) ve agregayı karıştırarak beton diye tanımlanabilecek malzemeler yapmışlardır. XIX. yüzyılda Joseph Aspdin ve Isaac Johnson'un çimentoyu keşiflerinin ardından, zaman içerisinde priz, hidratasyon ısı, sünme, rötre gibi olaylar açıklanarak günümüz beton teknolojisine ve betonarme yapılarına ulaşılmıştır. Betonun işlenebilirliği ve mukavemetinin artması, dış etkilere dayanıklı olması için mineral ve kimyasal katkıların kullanılması betonla ilgili yapılan son çalışmalardır [13].

2.7 Betonu Oluşturan Malzemeler

Beton; ince agrega, kaba agrega, çimento ve sudan oluşmaktadır. Çimento ve su birleşerek çimento hamurunu, ince ve kaba agrega ise birlikte agrega bileşimini oluşturur. Tüm bunların haricinde betonda bir miktar da hava bulunur. Ayrıca, betonun bazı özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek amacıyla kimyasal katkılar, mineral katkıları ve renk katkıları da ilave edilebilir.

2.7.1 Agregalar

Betonda kullanılan taneli malzemelere agrega denir. Agregalar doğal, yapay veya geri kazanılmış tipte olabilir [14].

Agregalar için yapılan genel sınıflandırma şu şekildedir [12].

- Kaynağına göre: doğal ve yapay
- Özgül ağırlık ve birim ağırlıklarına göre: ağır, hafif ve normal ağırlıklı

- Tane büyüklüklerine göre: iri, ince
- Tane şekline göre: yuvarlak, köşeli, yassı, uzun
- Yüzey dokusuna göre: düzgün, granüler, pütürlü, kristalli, petekli
- Elde ediliş şekillerine göre: doğal, yan ürün, ısıtılma tabii tutulmuş
- Jeolojik orijinlerine göre: volkanik, tortul, metamorfik
- Mineralojik yapılarına göre: silis mineralli, karbonat mineralli, mikalı
- Reaktif özelliklerine göre: (agregaların yapısında, çimento içerisindeki alkalilerle reaksiyona girerek betonda genişleme yaratabilecek reaktif silis ve reaktif karbonat içerip içermediklerine göre): reaktif, reaktif olmayan

2.7.1.1 Agregaların Fiziksel Özellikleri

a) Porozite

Porozite, tanelerdeki boşluk olarak tanımlanır. Agregatanelerindeki boşluk oranı su emme oranı deneyi ile hesaplanır. Porozite oranı azaldıkça tanelerin mukavemeti artar. İri taneli agregaların mukavemetinin yüksek olmasının nedeni budur. Agregaların emdiği su miktarı tanelerin kökenine, yapışma miktarına ve granülometri bileşimine bağlıdır. Doğal agregaların su emme oranı genellikle %2'nin üstüne çıkmamaktadır. İri agregaların su emme oranının, tanelerin büyük olması nedeniyle %2'den daha yüksek olması beklenir [15].

b) Agregat-su ilişkisi

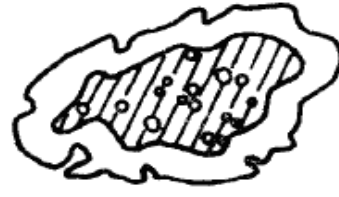
Agregataneleri arasındaki boşluklarda su 4 farklı şekilde bulunur [16]:

- Tamamen kuru taneler (fırın kuru): Agregatanelerinde herhangi bir şekilde su bulunmamaktadır.
- Kuru yüzeyli taneler (hava kuru): Tanelerin içindeki boşluğun bir kısmı su ile doludur, fakat tanenin yüzeyi tamamen kurudur.
- Yüzey kuru-suya doygun taneler: Tanelerin boşluklarının su ile dolması ve yüzeyinin tamamen kuru olması halidir.

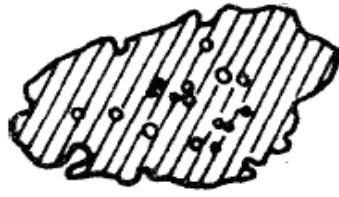
- Islak taneler: Agregadaki boşluklar su ile dolu olduğu gibi yüzeyde de serbest su vardır.



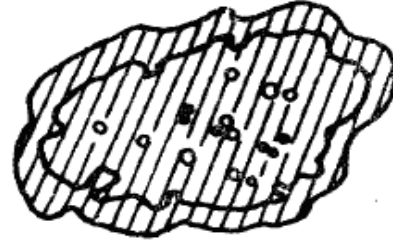
a) Tamamen kuru taneler



b) Kuru yüzeyli taneler



c) Yüzey kuru suya doygun taneler



d) Islak taneler

Şekil 2.2 Agreg-a-su ilişkisi [16]

c) Birim ağırlık

Birim ağırlık, yığın halindeki bir agreganın taneler arasındaki boşluklar da dahil birim hacminin ağırlığıdır. Agregayı kuru halde iken gevşek olarak bir kaba boşaltarak bulunan birim ağırlığa “gevşek birim ağırlık” ve yine kuru iken belli sayıda çubuk darbesi ile sıkıştırılarak bulunan birim ağırlığa ise “sıkışık birim ağırlık” denir [17]. Beton agregalarının birim ağırlığı 1,2-1,8 kg/dm³ arasında değişir [5].

d) Özgöl ağırlık

Belli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin, havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtık suyun havadaki ağırlığına oranıdır. Bu değer hesaplanırken taneler arasındaki boşluk dikkate alınmaz. Doğal agregaların çoğunluğunun özgöl ağırlığı 2,6-2,7 kg/dm³ arasındadır [18].

e) Komposite

Birim hacimdeki agregada, tanelerin işgal ettiği hacmin toplamıdır. Birim ağırlığın özgöl ağırlığa bölünmesi ile agreganın komposite hesaplanabilir. Birim ağırlık özgöl

ağırlıktan küçük olduğu için agreganın kompasitesi her zaman 1'den küçüktür. Agreganın kompasitesi düşük olursa betonun da kompasitesi düşük olur ve dolayısıyla betonun mukavemeti azalır [16].

f) Granülometri ve maksimum tane boyutu

Agreganın granülometresi hem taze beton hem de sertleşmiş beton özellikleri üzerinde etkilidir. Beton üretiminde kullanılacak agreganın granülometresi ideal granülometri eğrisine uymalıdır. Granülometrenin ideale uygun olması kompasitenin yüksek olmasını sağlar. Kompasitesi yüksek olan betonun dayanımı da yüksek olacaktır.

Agreganın maksimum tane boyutu da beton özelliklerini etkiler. Betonun kullanılacağı yerdeki yapı elemanının boyutları ve donatı sıklığı, maksimum tane çapının seçiminde etkilidir. Beton yapımında kullanılması mümkün olan en yüksek maksimum tane boyutu kullanılması ile beton karışımına giren su ihtiyacı azalır, betonda daha az büzülme oluşur, çimento ihtiyacı azalır, ekonomiklik sağlar ve hidrasyon ısı düşer, sabit işlenebilirlikte su/çimento oranı düşer, daha yüksek dayanım elde edilir. Beton üzerinde yapılan araştırmalar sonucunda maksimum tane büyüklüğü için en uygun boyutun 25 mm ve maksimum tane büyüklüğünün 40 mm olduğu ortaya çıkmıştır. Çünkü, maksimum tane boyutu çok büyük olan agregalardaki tanelerin yüzey alanlarının toplamı oldukça azdır. Bu nedenle çimento hamuru ve agrega yüzeyi arasındaki aderans azalmaktadır. Çimento hamurunun hacim değişiklikleri nedeniyle, çimento hamuru ile agrega tanelerinin yüzeyinde daha büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ayrıca maksimum tane boyutu çok büyük olan agregalar, betonun homojenliğini azaltmaktadır [13].

2.7.1.2 Agregaların Mekanik Özellikleri

Agregaların aşınma dayanımı, basma dayanımı, elastiklik modülü, poisson oranı, tokluğu ve sertliği mekanik özellikleri arasında sayılabilir.

Genel olarak agreganın basma dayanımı ve elastisite modülü, elde edildiği kayacın mineral bileşimine, doku ve yapısına bağlıdır. Düşük dayanım, iç yapı bileşen tanelerinin zayıflığı ve bunların birbirlerine yeterince bağlanamaması sonucu olabilir.

Betonda kullanılan agreganın basma dayanımına dair ortalama bir değer belirtmek gerekirse, bu değerin 200 MPa civarında olduğu söylenebilir [13].

Agreganın dayanımı ve sertliğinin yanı sıra, özellikle beton yüzeyinin aşınmaya maruz kalacağı durumlarda (yol ve yüzey betonları) agreganın aşınmaya dayanıklı olması gerekmektedir [18]. Türk standartlarına göre agreganın basma dayanımı 1000 kgf/m²' den az ise veya agreganın aşınma dayanımından kuşku duyuluyorsa, agreganın aşınma dayanımı test edilmelidir [14].

2.7.2 Çimento

Beton içerisinde bağlayıcı olarak çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Çimento ve su birleşerek imento hamurunu oluşturur ve imento hamuru agrega tanelerinin yüzeyini kaplayarak ve taneler arasında boşlukları doldurarak bağlayıcılık sağlar. Günümüzde bağlayıcı olarak en çok kullanılan malzeme Portland imentosudur.

2.7.3 Su

Beton karışımının hazırlanmasında kullanılacak olan suyun uygun kalitede olması, beton özelliklerini olumsuz olarak etkileyecek yabancı maddeleri içermemesi gerekmektedir. Beton teknolojisinde su; karışım suyu ve kr suyu olmak üzere farklı işlevlere sahiptir [19]. Beton karışım sularının genel olarak "içilebilir" nitelikte olması gerekmektedir. Ancak, içme suyu standartlarına uygun olmayan bazı suları da kullanarak iyi beton üretmek mümkündür. Uygun olmayan bir suyun karışımda kullanılması beton kalitesini olumsuz etkileyebilir. Çoğunlukla, zaman içinde, betonda dayanım gelişmesi en öncelikli dikkat edilecek husus olmakla birlikte, karışım suyunda bulunabilecek safsızlıklar priz süresini, rtreyi, dayanıklılığı da olumsuz etkileyebilir, betonda çiçeklenmeye neden olabilir.

Beton retiminde kullanılan karışım suyunun iki önemli işlevi vardır:

- Kuru haldeki çimentoyu ve agregayı plastik, işlenebilir bir kütle haline getirmek
- Çimento ile kimyasal reaksiyona girerek plastik kütlenin sertleşmesini sağlamak

Beton mukavemeti su/imento oranına bağlıdır. Çimento ağırlılığının %25'i oranında su ilave edilmesi, çimentonun hidratasyonu için yeterlidir. Beton retiminde kullanılacak

su miktarı istenilen işlenebilmeyi gerçekleştirmek için gerekli olan en az su miktarı olmalıdır. Bu nedenle taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacıyla fazladan su katmak beton mukavemetinin düşmesine neden olur. TS EN 206'ya göre karma suyu TS EN 1008'e uygun olmalıdır. Klorür içeriği ise TS EN 206-1 madde 5.2.7'de seçilen değerleri geçmediğinin gösterilmesi halinde TS EN 1008'de belirtilen değerleri geçebilir (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.4 Karma suyu kabul şartları [20]

Özellik	Kabul Şartı
Deterjanlar	Herhangi bir köpük iki dakika içerisinde kaybolmalıdır.
Renk	Geri kazanılan suların dışında rengi açık sarıdan daha açık olmalıdır.
Askıdaki Katı Madde Miktarı	Geri kazanılan suların dışında 4 ml'den az olmalıdır.
Koku	Geri kazanılan sularda içinde çimento veya yüksek fırın cürufu çimento olması halinde az bir miktar sülfür kokusu dışında koku bulunmamalıdır.
	Diğer sularda içilebilir sularda bulunanın dışında herhangi bir koku bulunmamalı, hidroklorik asit eklendiğinde hidrojen sülfür kokusu alınmamalıdır.
Asitler	pH≥4 olmalıdır.
Organik Madde	NaOH eklendiğinde belirlenen renk sarıya dönük kahverengi veya daha açık olmalıdır.

Çizelge 2.5 Karma suyu en yüksek klor içeriği [20]

Karışım Suyunun Kullanılacağı betonun Cinsi	En Yüksek Klorür İçeriği (mg/l)
Ön Germeli veya Şerbet	500
İçerisinde Donatı veya Diğer Metal Bulunan	1000
İçerisinde Donatı veya Diğer Metal Bulunmayan Beton	4500

Karma suyundaki sülfat miktarı 2000 mg/l'yi geçmemelidir. Alkali miktarı ise, ASR'ye karşı önlem alınmadıkça 1500 mg/l'yi geçmemelidir. Kirlenme ile ilgili sınır değerler belirlenmiş olmakla birlikte bunların priz süresine etkisi belirlenmelidir.

Çizelge 2.6 Kirlenme için sınır değerler [20]

Madde	En Fazla Miktar (mg/l)
Şekerler	100
Fosfat	100
Nitrat	500
Kurşun	100
Çinko	100

2.7.4 Mineral Katkılar

Cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu gibi çeşitli maddelere “mineral katkı” adı verilir. Mineral katkıları tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar, fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar, dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılır [21].

2.7.4.1 Uçucu Kül

Uçucu küller şekilsiz kristal fazların heterojen bileşenlerinden oluşan karmaşık yapıda bir malzemedir. Uçucu küllerin büyük bir kısmı boşluklu veya tam dolu camsı kürelerden oluşur. Toplam kütlenin %60-%90'ını bu camsı yapı oluşturur. Camsı yapıyla diğer bileşenler birbiriyle iç içe haldedir [22].

a) Kimyasal özellikleri

Uçucu küllerin ana bileşenleri SiO_2 (%35-%60), Al_2O_3 (%10-%30), Fe_2O_3 (%4-%20) ve CaO (%1-%35)'dir. Uçucu kül, normal olarak 200 nolu elekten (75 μm) %70-%80

oranında geçecek şekilde parçalanmış ve öğütülmüş kömürün yanması ile ortaya çıkar. F sınıfı küller genellikle antrasit veya taş kömürü yakılması suretiyle meydana gelir. C sınıfı külleri ise bitümlü şist veya linyit kömürünün yakılması ile meydana gelir [23]. F tipi uçucu kül olarak adlandırılabilmesi için ilk üç bileşenin toplamının en az %70 olması gerekmektedir. C tipinde ise en az %50 olmalıdır. C tipinde genel olarak %20'nin üzerinde CaO bulunmaktadır.

Çizelge 2.7 Farklı kömür türlerinden elde edilen uçucu küllerin kimyasal bileşimi (ağırlıkça) [24]

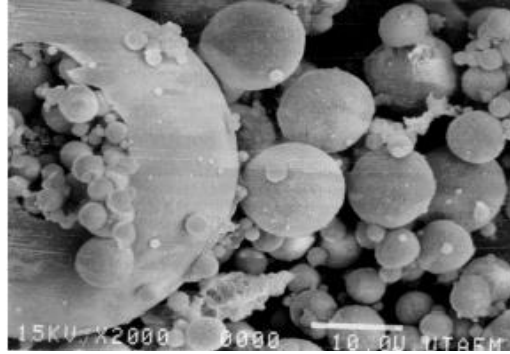
Bileşen (%)	Bitümlü	Alt-Bitümlü	Linyit
SiO ₂	20-60	40-60	15-45
Al ₂ O ₃	5-35	20-30	10-25
Fe ₂ O ₃	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO ₃	0-4	0-2	0-10
Na ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	0-3	0-4	0-4
KK	0-15	0-3	0-5

b) Fiziksel özellikleri

Uçucu kül taneleri, betonun su ihtiyacı üzerinde etkili olduğu için, uçucu külün şekil, incelik, tane büyüklüğü dağılımı, yoğunluğu taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkiler. Uçucu küller, kaynaklarına göre farklı renklerde olabilir. Ayrıca, yakma koşulları da uçucu külün renginin değişmesine neden olabilir.

Kömürün türü, yanma ortamı, toplama sisteminin tipi, uçucu külün tanecik şeklini etkilemektedir. İçi boş küre şeklindeki uçucu küllere “senosfer” denir. Ufak kül tanecikleri içeren küllere de “plerosfer” denir [23]. Şekilleri küresel veya uzunsudur.

Uçucu külün çimentoyla birlikte öğütülmesi dayanıma olumlu etkide bulunur. Uçucu külün aşırı ince öğütülmesi su ihtiyacını artırır.



Şekil 2.3 Uçucu kül SEM görüntüsü (×2000) [25]

Uçucu kül tanelerinin boyutu 1 μm -1 mm arasında değişmektedir. Betonda puzolan olarak kullanılması uygun olan uçucu küllerdeki tanelerin çoğu, 325 nolu (45 μm) elekten geçerler. Belli bir kaynaktan elde edilen uçucu küllerin tanecik dağılımı, kömür kaynağında, kömür öğütülmesinde, proseste ve santral yükünde büyük bir değişiklik olmazsa genellikle sabit kalır [23].

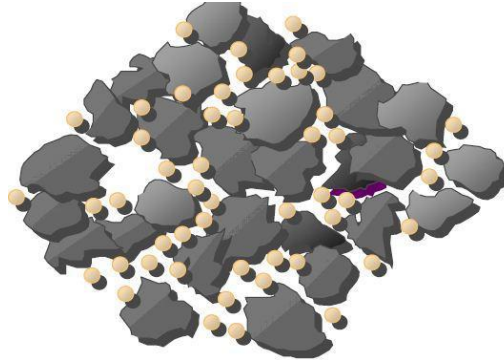
Uçucu kül tanelerinin inceliği beton özelliklerini etkilemektedir. Uçucu kül tanesi irileştikçe küresel ve dolu yapısı kaybolmakta buna bağlı olarak da tanelerin birbiri üzerindeki kayganlaştırıcı etkisi azalmaktadır. Şekilsiz, süngerimsi bir yapıya sahip olan iri taneler taze betonda iç sürtünmeyi ve su ihtiyacını artırmaktadır.

Boşluksuz, dolu uçucu küllerin yoğunluğu genel olarak 1,97-3,02 kg/dm^3 arasında değişmektedir. Ancak, genelde 2,2-2,8 kg/dm^3 arasında bir değer almaktadır. Yoğunluk üzerinde uçucu külün kimyasal bileşiminin etkisi vardır. Demir oranı yüksek olan uçucu küller daha ağır, karbon oranı yüksek olan uçucu küller ise daha hafiftir. C tipi uçucu küllerin yoğunluğu F tipi uçucu küllere göre daha yüksek değerlerdedir. Bunun nedeni ise C tipi uçucu küllerde daha az içi boş küresel yapıda tanelerin var olmasıdır.

c) Beton üretimindeki rolü

Uçucu kül, beton ve harç üretiminde büyük çoğunlukla ikincil bağlayıcı madde şeklinde, portland çimentosunun ağırlık yüzdesi oranında çimentonun bir kısmı yerine veya ilave olarak, bazen de çimentoya önceden karıştırılarak çimento katkısı şeklinde kullanılır [26].

Uçucu külünün kalsiyum hidroksit ve alkalilerle reaksiyonu sonucunda oluşan ürün CSH jeli portland çimentosunun da ana hidratasyon ürünüdür. Hidroksit iyonları ve portland çimentosu arasında meydana gelen kimyasal reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ısı, uçucu külün reaksiyona girmesini sağlar. Uçucu kül reaksiyonları iki adımda meydana gelir. İlk adımda alkali hidroksitlerle, ikinci adımda kalsiyum hidroksitle reaksiyon meydana gelir.



Şekil 2.4 Çimento aralarındaki boşlukları dolduran uçucu kül [26]

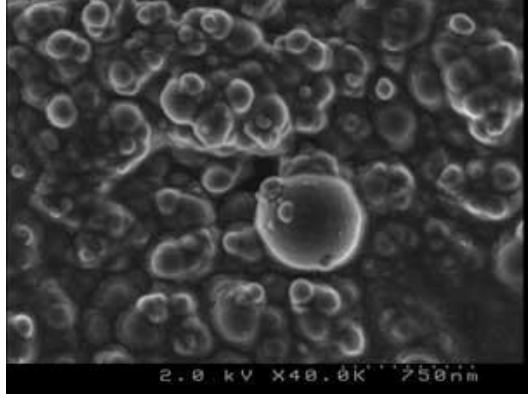
Uçucu kül, çimento hamurunda hidrate olmuş partiküller arasındaki boşlukları doldurur. Böylece su geçirimsizliği azalır ve kimyasal zararlara dayanımı artar. Uçucu kül kullanımı ile, portland çimentosu kullanım miktarı azalır, enerji tasarrufu sağlanır ve atık bir malzemenin kullanımı ile çevreye katkı sağlanır.

2.7.4.2 Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya silisyumlu metal alaşımlarının üretimi esnasında, yüksek saflıkta kuvars, 2000°C sıcaklıktaki elektrik fırınlarında kömür yardımı ile indirgenmeye tabi tutulmaktadır. Bu esnada ortaya çıkan ve büyük miktarda SiO_2 'den oluşan gaz, ani bir şekilde soğutulurken, amorf yapıya sahip SiO_2 'ye dönüşmektedir. Bu malzeme ince katı bir hal alır ve "silis dumanı" olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu malzeme, yüksek miktarda amorf SiO_2 içermesinden ve ince taneli bir malzeme olmasından dolayı puzolanik malzeme olarak kullanılabilir. Silis dumanı gri renktedir. Karbon oranı arttıkça, rengin koyuluğu da artar. Silis dumanının kimyasal bileşimde demir oksit olması hafif kahverengimsi bir renk verir.

Silis dumanı özgül ağırlığı ortalama 2,20 civarındadır. Bu değer alaşım türüne ve kaynağına göre biraz değişebilmektedir [27]. Silis dumanının gevşek birim ağırlığı 130-

140 kg/m³ arasında değişir. Sıkıştırılmış silis dumanında ise birim ağrılık 500 kg/m³ civarındadır.



şekil 2.5 Silis dumanının SEM görüntüsü [27]

Çimento hamurunda, imento tanelerine göre çok daha ince olan silis dumanı taneleri imento tanelerinin arasına girerek fazla olan suyu dışarı atarlar ve bu durum olumlu bir etki yaratır. Ancak, çok fazla miktarda silis dumanı ilavesi olduğunda, oluşan büyük yüzey alanı nedeniyle su ihtiyaı artar ve betonun kıvamı bozulur. Yapılan araştırmalar sonucunda imento hamuruna %15 oranına kadar silis dumanı ilavesinin su ihtiyaını etkilemediği, ancak daha yüksek oranlarda silis dumanı ilave edildiğinde su ihtiyaının arttığı ortaya çıkmıştır [21].

Silis dumanı, agrega-hamur ara yüzeyini kuvvetlendirerek beton dayanımını artırmaktadır. İnce silis dumanı taneleri ara yüzeydeki boşlukları doldurmakta, terleme azaldığı için agrega taneleri altında daha az su toplanmakta ve daha yapışkan hale gelen hamur ile agrega taneleri arasında aderans artmaktadır. Silis dumanının beton basma dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal koşullarda bu etki 3-28 gün arası kendini gösterir. İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup, bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90. günden sonra düşebilmektedir [21].

2.7.5 Kimyasal Katkılar

Taze veya sertleşmiş betonun bazı özelliklerini değiştirmek üzere, karıştırma işlemi esnasında betona, imento kütlesine oranla az miktarlarda ilave edilen malzemelere “kimyasal katkı” denir [28].

Kimyasal katkılar şu şekilde sıralanabilir:

- Su azaltıcılar (akışkanlaştırıcılar)
- Priz geciktiriciler
- Priz hızlandırıcılar
- Su azaltıcı ve priz geciktiriciler
- Su azaltıcı ve priz hızlandırıcılar
- Yüksek miktarda su azaltıcı ve priz geciktiriciler
- Hava sürükleyiciler

Kimyasal katkılar beton içerisinde çimento ağırlığının yaklaşık %1-%2'si kadar katılarak kullanılmalarına rağmen, beton özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Kimyasal katkı maddeleri; beton içerisinde kullanılan karışım suyunu azaltmak, priz sürelerini uzatmak veya kısaltmak, karışım suyu miktarını değiştirmeksizin işlenebilirliği arttırmak, beton içerisine hava kabarcıkları sürüklemek gibi betonun birçok özelliğini etkilemektedirler. Bu katkı maddeleri doğrudan betona katılabildiği gibi, beton karışım suyuna da eklenebilmektedirler. Katkı maddelerinin beton içerisinde kullanıldıkları miktarlar önemlidir. Çünkü bu maddeler gereğinden fazla kullanıldıklarında beton özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedirler.

a) Su azaltıcılar (Akışkanlaştırıcılar)

Betonda aynı kıvamın veya işlenebilirliğin daha az su ile elde edilmesini sağlarlar. Taze betonda kullanılan su miktarı azaldıkça betonun dayanımı artar. Azalttığı su miktarı ile orantılı olarak normal akışkanlaştırıcılar ve süper akışkanlaştırıcılar olarak ikiye ayrılırlar [29].

b) Priz geciktiriciler ve priz hızlandırıcılar

Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdırlar. Priz hızlandırıcılar ise, betonun katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun katılaşmış olmasını sağlamak için kullanılırlar [29].

c) Antifirizler

Suyun donmasını zorlaştırır ve don neticesi çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamaya engel olurlar. Bu katkıların betondaki miktarı hava sıcaklığına göre ayarlanabilir [29].

d) Hava sürükleyici katkılar

Beton içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini, dona karşı direncini ve işlenebilirliğini artırır [29].

e) Su geçirimsizlik katkıları

Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır. Yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması, uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır [29].

2.7.6 Renk Katkıları

Betona farklı renkler vermek amacıyla, saf mineraller renk katkıları olarak kullanılmaktadır. Renk katkıları kullanılmadan önce, katkı kullanımının betonun diğer özelliklerini etkileyip etkilemediği incelenmelidir. Genellikle çimento miktarının %10'u oranında renklendirici katkı kullanılır. Renklendirici katılara örnek olarak; siyah demir oksit, karbon siyahı, kırmızı demir oksit, kahverengi demir oksit, kobalt mavisi, ultramarin mavisi, krom oksit, yeşil ftalosiyanın verilebilir [5].

2.8 Taze Betonun Özellikleri

Henüz tamamen katılaşmamış, şekil verilebilir durumdaki betona “taze beton” adı verilir. Betonun taşınması, kalıplara yerleştirilmesi, yüzeyinin düzeltilerek şekil verilmesi gibi işlemler beton taze iken yapılmalıdır, çünkü çimento ile suyun karıştırılması ile başlayan hidrasyon zaman geçtikçe ilerler ve bir süre sonra beton şekil verilemez hale gelir. Ne kadar iyi bir taze beton elde edilirse, o derecede iyi sertleşmiş beton elde edilebilir.

İyi özelliklere sahip sertleşmiş beton elde edebilmek için taze betonda bulunması gereken özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Beton üretiminde kullanılan malzemeler homojen dağılım gösterecek şekilde karıştırılabilmelidir.
- Taze beton, homojenliği bozulmadan kolayca taşımaya elverişli olmalıdır.
- Kalıplara yerleştirilmesi esnasında, kalıp içindeki her noktaya ulaşacak düzeyde kolayca yerleştirilebilir, homojenliği bozulmadan sıkıştırılabilir ve yüzeyi kolayca düzeltilebilir olmalıdır.
- Taze beton mümkün olduğunca az terleme göstermelidir.
- Betonun kullanılacağı ortama uygun olacak priz süresine sahip olmalıdır.

2.8.1 İşlenebilirlik ve Kıvam

İşlenebilirlik, taze betonun kullanılacağı amaca göre karıştırılma, yerleştirilme, sıkıştırılma ve düzeltilme kolaylığının ve homojenliğinin seviyesini gösteren bir değerdir. İşlenebilirliği yüksek olan bir beton taşıma ve kalıba yerleştirme sırasında kohezyonunu ve homojenliğini kaybetmez, mümkün olduğunca az boşluk yaratacak şekilde kalıpta yayılır, minimum enerjiyle karıştırılarak kalıba yerleştirilebilir [30].

İşlenebilirlik özelliği, betonun yapısından kaynaklanan şu özellikler ile ilgilidir [31]:

- Taze beton kütesinde akma başlatacak kuvvete karşı betonun göstereceği direnç (kayma dayanımı)
- Akma başladıktan sonraki hareketlilik (akıcılık)
- Betonu oluşturan malzemelerin birbirine bağlanma derecesi, böylece segregasyona karşı gösterdiği direnç (kohezyon)
- Yerleştirmeyi ve yüzeyin düzeltilmesini etkileyen yapışkanlık

İşlenebilirlik, betonun bileşenlerinden ve beton yapımı esnasındaki koşullardan etkilenir. Çimento miktarı ve özellikleri, ince ve iri agregaların granülometrisi, biçimleri ve yüzey özellikleri, karışımdaki agrega oranları, sürüklenen hava miktarı, puzolanın tipi ve miktarı, kimyasal katkıların tipi ve miktarları, betonun sıcaklığı, karıştırılma yöntemi ve suyla çimentonun temas etme zamanı gibi faktörler işlenebilirliği etkileyen temel parametrelerdir.

Betonun kararlılığını etkileyen üç ana faktör vardır. Bunlar; su/çimento oranı, agrega/çimento oranı ve su miktarıdır. Agrega/çimento oranı azaltılırsa, su/çimento oranının değişmemesi için su miktarı artırılmalıdır. İnce agrega/iri agrega oranında bir artış olursa, uygun işlenebilirliği sağlamak amacıyla su miktarının artırılması gerekir. İşlenebilirlik yeteneğinin artırılması için su miktarının yükseltilmesi yerine, iri ve ince agrega oranlarının iyi ayarlanması ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılması en akılcı çözüm yöntemidir [32].

Yuvarlak şekilli agregalar, köşeli agregalara göre daha fazla suya ihtiyaç duyarlar. Ayrıca, doymun olmayan ve su emme oranı yüksek olan agregalar, çimento hamurundan su emerek işlenebilirliği düşürürler. Çimentonun inceliğinin artması, hidratasyonu artırarak betonda aşırı miktarda terlemeye neden olur ve işlenebilirliği düşürür. Su/çimento oranı yüksek tutulmuş olan akıcı betonlarda karıştırma ve yerleştirme işleri düşük enerjiyle yapılabilir, ancak bu tür betonlarda kendini tutabilme özelliği (kohezyon) yeterli olmaz [33].

Kimyasal katkı maddeleri dikkate alındığında ise hava sürükleyici ve su azaltıcı katkılar işlenebilirliği iyileştirir. Hava sürükleyiciler çimento hamuru hacmini arttırarak terlemeyi ve segregasyonu azaltırlar. Su azaltıcı katkılar ise çimento taneciklerini çevreleyerek işlenebilirliği arttırırlar. Mineral katkılar veya puzolanlar mukavemet ve dayanıklılığı arttırdıkları gibi işlenebilirliği de arttırırlar. Bağlayıcı malzemenin bir bölümü uçucu küller yer değiştirecek olursa külün küresel yapıdaki tanecikleri sayesinde işlenebilirlik artar. Silis dumanı gibi çok ince mineral katkılar ise su ihtiyacını artıracığı için işlenebilirliği olumsuz etkilerler [33].

Taze betonun ıslaklık derecesini ve akıcılığını ifade etmek amacıyla “kıvam” kavramı kullanılmaktadır. Agreganın cinsi ve jeolojik kökeni, yüzey özelliğini ve kıvam derecesini etkilemektedir. Kıvamlarına göre taze betonlar; kuru (nemli toprak görünümünde), plastik ve akıcı olmak üzere üç şekilde gruplandırılmıştır. Bu sınıflandırmada betonun su içeriği dikkate alınmıştır.

Çökme deneyi kolay uygulanabilir bir deney olduğundan dolayı taze betonun kıvamını belirlemek amacıyla kullanılan en yaygın yöntemdir. Çökme deneyi statik bir deneydir ve işlenebilirliği ölçmez. Bu deney yardımıyla işlenebilirlik hakkında fikir elde edilebilir.

Çizelge 2.8 Beton kıvam sınıfları [34]

Kıvam Sınıfı	Çökme Değeri (cm)
S1	0-5
S2	5-10
S3	10-16
S4	16-22
S5	22≤

Taze betonun kıvamı arttıkça, karıştırılması, pompalanması ve yerleştirilmesi daha kolay bir şekilde yapılabilir. Ancak, beton kıvamının çok yüksek olması işlenebilirliğin iyi olduğu anlamına gelmez.

2.8.2 Birim Ağırlık

Taze betonun birim hacminin ağırlığına “birim ağırlık” denir ve kg/m^3 veya ton/m^3 cinsinden ifade edilir. Betonun bileşenlerinin özgül ağırlıkları ve beton içerisinde bulunan havanın hacmi betonun birim ağırlığını etkilemektedir. Taze betonun, kimyasal bileşim açısından benzer malzemelerle ve aynı oranlarda üretilmiş farklı betonlarla benzer birim ağırlık göstermesi beklenir.

2.8.3 Betonda Segregasyon (Tanelerin Ayrışması)

Segregasyon, betonun hazırlanması, taşınması, yerleştirilmesi sırasında beton karışımındaki iri tanelerin ince tanelerden ayrılması olayına denir. Bir başka ifade ile, taze betonu oluşturan bileşenlerin ayrışması ve düzensiz bir karışım meydana gelmesidir. Segregasyon iki şekilde meydana gelmektedir:

- İri agregaların eğik düzlem boyunca ince agregalardan daha hızlı yol alması şeklinde
- Özellikle sulu karışımlarda iri agregaların çökmesi şeklinde

Betonun hazırlanma yeri ile yerleştirilme yeri arasındaki mesafenin kısa olması segregasyon riskini azaltmaktadır. Beton hazırlama santralinin uzakta olması durumunda taşıma işleminin mikserlerle yapılması gerekmektedir. Segregasyon,

genellikle yanlış vibrasyon uygulamasından kaynaklanmaktadır. Vibrasyon işlemi betonun iyi bir şekilde sıkıştırılmasını sağlar, ancak yanlış ve uzun süre uygulanırsa kaba malzeme aşağıda çimento hamuru yukarıda toplanır ve özellikleri zayıf heterojen bir karışım oluşur.

2.8.4 Betonun Terlemesi

Terleme, taze karışım içindeki suyun kalıba yerleştirilmiş betonun yüzeyinde birikmesidir. Segregasyon veya agregaların bünyelerinde suyu tutamamaları gibi nedenlerle terleme oluşabilir. Terleme sonucu yüzey ıslak hale geldiğinden çimentonun hidratasyonu için gerekli olan su kaybedilmiş olur, ancak fazla su ekleyerek bu sorunu telafi etmeye çalışmak boşluklu ve düşük mukavemetli betonun ortaya çıkmasına neden olur.

Terleme suyu üst yüzeyin bitirilmesi sırasında karıştırılırsa zayıf taşıyıcı bir yüzey oluşur. Dolayısıyla terleme suyu tamamen buharlaşıncaya kadar yüzeyde herhangi bir düzeltme yapılmamalıdır. Beton yüzeyindeki buharlaşma hızı, terleme oranının gelişme hızından daha fazla ise, plastik büzülme (rötre) çatlakları meydana gelir [35].

2.9 Sertleşmiş Betonun Özellikleri

Taze betonun iyi özelliklere sahip olması, sertleşmiş betonun özelliklerinin de iyi olmasını sağlar. Sertleşmiş betondan beklenen özellikler aşağıda açıklanmaktadır.

2.9.1 Betonun Dayanımı

Beton dayanımı; “üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı betonun gösterebileceği maksimum direnç” olarak tanımlanmaktadır [36]. Gevrek bir malzeme olan betonun çekme dayanımı çok düşük, basma dayanımı yüksektir. Bu iki dayanım arasındaki fark 1/10 mertebesinde.

Beton dayanımını oluşturan unsurlar [21]:

- Çimento hamurunun dayanımı
- Agreganın dayanımı
- Çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans

Beton dayanımını etkileyen faktörler [21]:

- Su/çimento oranı
- Karma suyunun kalitesi
- Çimento özellikleri
- Agreganın özellikleri
- Betona uygulanan, üretim, taşıma ve sıkıştırma işlemleri
- Kür koşulları ve betonun yaşı

2.9.1.1 Basma Dayanımı

Eksenel basma yükü etkisiyle betonda oluşan maksimum gerilme “basma dayanımı” olarak tanımlanmaktadır.

Betonun basma dayanımını belirlemek amacıyla farklı yöntemler uygulanmaktadır (karot numunelere uygulanan basma dayanımı yöntemi, beton test çekici uygulaması, ultrasonik test cihazı yardımıyla ölçüm). Ancak en çok kullanılan yöntem standart basma dayanımı deneyidir. Betonun standart basma dayanımı, 28 günlük, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin, eksenel basma yükü altında dayanımı olarak tanımlanır [37].

Standart basma dayanımı belirleme deneyinde silindir ve küp olmak üzere iki tip numune kullanılmaktadır. Silindir numuneler 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğindedir. Küp numunelerinin kenar uzunluğu 15 cm’dir (15×15×15). Silindir numune dayanımlarının, küp numune dayanımlarına oranı 0,8-0,85 olduğu bilinmektedir. Fakat bu oranın kimi zaman 0,7’ye kadar düştüğü veya 1,1’e kadar çıktığı da tespit edilmiştir. Standartlarda her beton sınıfı için sağlanması gereken silindir ve küp dayanımları birlikte belirtilmiştir [19].

Betonun basma dayanımını etkileyen faktörler; iç ve dış faktörler olarak iki grupta incelenebilir. İç faktörler betonu oluşturan malzeme tipi ve oranlarından, dış faktörler ise betonun üretimi, bakımı ve servis ömrü boyunca maruz kalacağı etkilerden kaynaklanmaktadır. Çimento türü, su/çimento oranı, agrega özellikleri, kimyasal veya mineral katkıları, betonun boşluk yapısı vb. iç faktörlere, beton döküm ve kür sıcaklığı, kür koşulları, deney koşulları, vb. ise dış faktörlere örnektir [38].

Çizelge 2.9 Beton sınıfları [34]

Beton Sınıfı	Karakteristik Silindir Basma Dayanımı, f_{ck} (N/mm ²)	Esdeğer Küp (150 mm) Basma Dayanımı (N/mm ²)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, f_{ctk} (N/mm ²)	28 Günlük Elastisite Modülü (N/mm ²)
C16/20	16	20	1,4	27000
C18/22	18	22	1,5	27500
C20/25	20	25	1,6	28000
C25/30	25	30	1,8	30000
C30/37	30	37	1,9	32000
C35/45	35	45	2,1	33000
C40/50	40	50	2,2	34000
C45/55	45	55	2,3	36000
C50/60	50	60	2,5	37000

2.9.1.2 Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, “betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti” olarak ifade edilmektedir. Betonun üzerine gelen basma ve eğilme kuvvetleri betonun içerisinde çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Betonun çekme dayanımı ise üç şekilde belirlenebilir. Bunlar; prizmalara eksenel çekme gerilmeleri uygulamak, silindirik numuneleri yatay düzlem üzerine yatırmak ve bir doğrultu boyunca kuvvet uygulamak (dolaylı çekme deneyi), prizmatik numuneler üzerinde eğilme deneyi.

2.9.2 Betonun Durabilitesi (Dayanıklılığı)

Betonun durabilitesi; belirli özelliklere ve fonksiyonlara sahip olacak şekilde üretilen betonun kullanım süresi boyunca, çevre ve kullanım koşulları altında özelliklerini

korumasıdır. Beton bu koşullar altında yıpranarak özelliklerini yitirir, daha fazla kullanımı artık ekonomik olmaz ve güvenli kabul edilmezse faydalı ömrünü tamamlamış olur [39].

Durabilite, zaman faktörü ile doğrudan ilişki içerisinde. Beton üretiminden önce, betonun kullanım yeri ve kullanım amacı iyi tespit edilerek dış etkenler belirlenmeli ve betonun özellikleri uygun dayanıklılığı sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Durabiliteyi olumsuz olarak etkileyen fiziksel ve kimyasal olaylar şunlardır [21]:

- Betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve beton yüzeyinde “çiçeklenme” olması
- Sülfat etkisi
- Deniz suyu etkisi
- Asit etkisi
- Karbonatlaşma
- Alkali-agrega reaksiyonu
- Betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu
- Donma-çözülme etkisi
- Beton yüzeyinin pullanması
- Aşınma

2.9.2.1 Betonda Çiçeklenme

Çiçeklenme, betonun hidratasyonu sonucunda oluşan Ca(OH)_2 'nin ve beton içerisinde bulunan bazı tuzların zamanla sertleşmiş beton yüzeyine çıkarak oluşturduğu beyaz lekelerdir. Renkli betonlarda estetik açıdan renk kalitesini bozmakla beraber betonun dayanımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur [40]. Çiçeklenme oluşumunun nedenleri:

- Suda çözünen sülfat, nitrat, klor, krom, molibden tuzlarını içeren yeraltı suyunun yukarı hareket ederek, temele ya da beton kaplamaya geçmesi
- Yıkanmamış malzeme kullanılması
- Standarda uygun olmayan su kullanılması

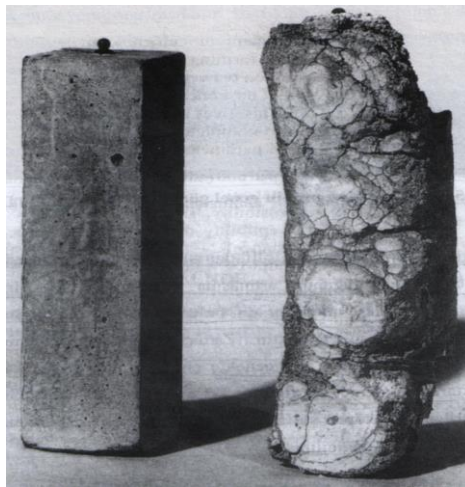
- Betonun fazla geçirgen yapıda olması

Nemli ortamın çiçeklenme olayına büyük etkisi olmaktadır. Çiçeklenme, yağışlı kış sezonunda daha çok olmaktadır, ilkbaharda azalmakta ve yazın hemen hemen hiç yer almamaktadır. Ancak, kuru ve sıcak mevsimi takip eden bir başka soğuk ve yağışlı ortamda çiçeklenme tekrar yer almaktadır. Beton yerleştirilmesini takip eden ilk aylarda büyük hızla yer alan çiçeklenme olayı, zamanla azalmakta ve genellikle üç dört yıl sonra sona ermektedir [21].

2.9.2.2 Sülfat Etkisi

Doğal sularda ya da atık sularda belli bir miktarda sülfat bulunabilir. Özellikle yeraltı sularında sülfat iyonlarının miktarı yüksek seviyede olabilir. Sülfat iyonları betona geçerek çimentonun hidratasyonu ile elde edilen kalsiyum hidroksit ve kalsiyum alüminat hidratlarla reaksiyona girerek, alçı ve etrenjit oluşumuna neden olur. Bunlar da genişleyerek çatlamlara neden olur. Bu olaya “sülfat etkisi” denir [41]. Sülfat etkisi, betonun yüzeyinde beyazımsı bir renk oluşmasına neden olur. Yıpratıcı etki genel olarak betonların köşelerinden başlar, zaman geçtikçe iç kısımlara doğru ilerler. Son olarak da betonun yüzeyi parçalanır.

Sülfat etkisini azaltmak için C_3A (trikalsiyum alüminat) miktarı az olan (en çok %5) çimento kullanılabilir. Bu tür çimentolar sülfata dayanıklı çimentolardır. Ayrıca, betonda çeşitli puzolanlar ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılabilir.



Şekil 2.6 Sülfat etkisiyle ağır hasar görmüş beton eleman [42]

Sülfat etkisinde reaksiyon oluşumunu etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir [42]:

- Etkilenme koşulları (SO_4^{-2} içeriği, ortam koşulları)
- Betonun geçirimliliği (zararlı madde taşınımı)
- Betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı)
- Suyun varlığı

2.9.2.3 Deniz Suyu Etkisi

Deniz suyunun beton üzerindeki yıpratıcı etkisi çözünmüş bazı tuzları içermesinden kaynaklanmaktadır. Deniz suyunda önemli miktarlarda bulunabilen tuzlar, sodyum klorür (NaCl), magnezyum klorür (MgCl), magnezyum sülfat (MgSO_4), kalsiyum sülfat (CaSO_4), potasyum klorür (KCl) ve potasyum sülfat (K_2SO_4) olarak sıralanabilir. Çimento hidratasyon ürünlerine kimyasal saldırı açısından bakıldığında ise deniz suyunun yüksek miktarda sülfat ve magnezyum içerdiği söylenebilir. Ayrıca, deniz suyunun yüksek miktarda çözünmüş oksijen ve karbondioksit içerebildiği ve bu gazların yoğunluğunun lokal şartlara göre çok değişken olduğunu ilave etmek gerekir [42].

Etkin kimyasal oluşumu açısından, deniz suyu hidrate çimento bileşenleri ile reaksiyon yapabilen magnezyum ve sülfat iyonları içerir. Deniz suyunda çözünmüş bulunan CO_2 karbonik etkisi yapar. İçerdiği yüksek sülfat iyon konsantrasyonu ile deniz suyu beton üzerinde sülfat etkisi yapar, C_3A ve CSH ile sülfat iyonlarının reaksiyonundan etrenjit oluşur. Deniz suyunun beton üzerindeki bir diğer kimyasal etkisi ise magnezyum iyonlarının kalsiyum iyonlarıyla yaptığı yer değiştirme reaksiyonudur. Reaksiyon sonucunda oluşan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ “brusit” adıyla bilinir. Çökelerek yüzeydeki gözenekleri tıkar ve koruyucu tabaka oluşturur. Bu tabaka genellikle suya gömülü bölgede görülür [43].

Deniz üstü (atmosfer) alanında tuza doymuş hava, rüzgarla taşınarak karada klorların yoğunlaşarak depolaşmasına neden olur. Sonuç olarak klor betondaki çatlak ve geçirgen kısımlardan içeri girerek betonarme donatısına varır ve donatı korozyonunu başlatır. Batık alanda ise (tamamen su içerisinde) deniz suyunun, çimento hidratasyon ürünleri ile kimyasal reaksiyona girmesi nedeniyle yapıda bozuşma ve dökülmeler

görülür. Bu bölgede oksijen olmadığı için donatı korozyonu, donma çözülme olayı görülmez [43].

2.9.2.4 Asit Etkisi

Rutubetli ortamda, kükürt dioksit (SO_2) ve karbondioksit (CO_2), hatta atmosferde bulunan diğer bazı gazlar, çözünmek suretiyle asitleri oluşturarak ve çimento klinker bileşikleri ile reaksiyona girerek yumuşak, çok zayıf bir beton kitlesi oluşmasına neden olabilirler. Hemen hemen bütün asitler kireç, çimento, harç ve beton üzerine değişik şekillerde etki ederler. Beton yapının aside maruz kalmasındaki en alışılmış sebep ise betonun yer altı madenlerine çok yakınlıkta bulunmasıdır. Bu madenlerden çıkan drenaj sularının içerdiği asit bazen ansızın düşük pH değerlerine iner. %15-20 oranında sülfürik asit çözeltisinin pH değeri 1 olacaktır. Bu tür çözeltiler betona çok çabuk hasar verirler. pH 5-6 değerindeki seviyelere sahip asidik sular eğer betona uzun süre temas ederlerse hasar verebilirler.

Pratikte tesir derecesi, asidite yükselmesi (pH düşüşü) ile yükselir. Normal olarak asit tesiri, yaklaşık pH 6,5 değerinde gerçekleşir, pH 4,5'un altında ise şiddetli bir şekilde meydana gelir. pH 6-6,5 değerinden itibaren asitler betonu etkilerler, bu değer azalmasıyla etki şiddeti daha artar.

Asitlerin yol açtığı hasarlar kolaylıkla saptanabilir. Asit, betonun portland çimento harcı matrisiyle reaksiyona girer ve çimentoyu kalsiyum tuzlarına dönüştürür. Kaba agregalar genellikle zarar görmemiş fakat maruz kalmış olarak kalır. Asit etkisine maruz kalmış betonun görünümü bir dereceye kadar aşınım hasarlarına benzerlik gösterir, yalnız kaba agreganın maruz kalması daha belirgin olmakta ve parlak görünmemektedir. Asit genellikle yüzeyde yoğunlaşır. Betonun içine işlediğinde ise portland çimento ile tepkimeye girerek nötralize olur [44].

2.9.2.5 Karbonatlaşma

Çimento hidratasyon ürünlerinin ve özellikle Ca(OH)_2 'nin havadaki CO_2 gazıyla birleşerek nötr bir tuz olan kalsiyum karbonata dönüşmesi olayına "karbonatlaşma" denir. Karbonatlaşma, beton ve özellikle çimento hamuru iç yapısında önemli

değişikliklere yol açar. Donatı korozyonu dışında meydana gelen olaylar olumludur. Kılcal boşlukların çapları küçülür, mukavemette yükselme gözlenir, karbondioksit ve oksijen gazı difüzyonları azalır, beton durabilite açısından iyileşir [45].

Karbonatlaşmanın, sadece kirecin varlığına dayandığı kanısı yanlıştır. Alçı taşı dışındaki tüm çimento hidrate bileşenlerinin karbonatlaşma olasılığı vardır. Havadaki CO₂'in sertleşmiş çimento fazı içine difüzyonu ve buradaki sulu ortamda çözünmesi, yani bir anlamda karbonik aside dönüşmesi, reaksiyonun başlaması için ilk şarttır. Çimento fazı OH⁻ iyonu açısından zengindir. OH⁻ iyonu konsantrasyonu yüksek olunca Ca(OH)₂'nin çözünürlüğü azalır, ara yer çözeltisinde Ca(OH)₂ aşırı doymun hale gelir, kristalleşir. Oluşan katı Ca(OH)₂'in karbonik asitle reaksiyona girmesi düşünülemez. Ca(OH)₂'nin çözünmesi ve karbonatlaşması araya bir başka alkalinin, NaOH veya KOH'ın girmesiyle olur [45].

2.9.2.6 Beton Yüzeyinin Pullanması

Beton yolların, kaldırımların, park yerlerindeki ve hava alanı pistlerindeki betonların üzerinde kışın oluşmakta olan buz tabakasından kurtulabilmek için, beton yüzeyine “buz çözücü” tuzlar serilmektedir. Kalsiyum klorür ve sodyum klorür, en yaygın olarak kullanılmakta olan buz çözücü tuzlardır.

Beton yüzeyine serilen buz çözücü tuzlar, zamanla beton yüzeyindeki rastgele noktalarda, kum ve çakılın gevşeyip çıkmasına, lokal boşluklar, patlaklar oluşmasına ve beton yüzeyinden ince bir tabakanın balık pulu gibi sıyrılıp kalkmasına neden olabilmektedirler. Beton yüzeyinin ince tabakalar halinde gevşeyip kopma göstermesine “pullanma” denilmektedir. Beton yüzeyine serilen tuzlar, yüzeyde pullanma yarattığı gibi, betonun içerisindeki demirin korozyonunu da artırmaktadır [21].

2.9.3 Geçirimsizlik

Sertleşmiş beton ile temas eden sıvı ve/veya gaz maddeler, betonun içerisine girerek akış gösterebilmektedirler. Sıvıların ve gazların beton içerisinde akış gösterebilmeleri betonun “geçirimsizlik” özelliği ile ilgilidir.

Betonun durabilitesi açısından beton geçirimliliği ve betonun boşluk yapısı oldukça önemlidir. Çünkü betonu etkileyen dış etkenler beton içerisine, kılcal boşluklar vasıtası ile nüfuz etmektedir. Aynı zamanda betonda yer alan boşluklar betonun dayanımını da olumsuz etkilemektedir. Betonun geçirimliliği ne kadar az olursa, bahsedilen dış etkenler beton içerisine nüfuz edemeyeceği için betonun olumsuz etkilenmesi engellenmiş olacaktır [19].

Beton depolar ve barajların yapımında kullanılan betonlar başta olmak üzere, içerisinde su veya başka bir sıvı bulunduran bütün betonların mümkün olduğunca geçirimsiz olması beklenmektedir [12].

Betonda değişik tip boşluklar bulunmaktadır. Çimento hamuru içinde boyutları en küçük olan jel boşlukları ve daha büyük boşluklara sahip kapiler boşluklar bulunmaktadır. Bunların dışında çimento hamuru ile agrega taneleri arasında boşluklar olduğu gibi agrega tanelerinde de boşluklar bulunmaktadır. Ancak, beton içerisindeki boşluk geçirimliliği etkileyen tek faktör değildir. Geçirimsizlik boşluk miktarından başka, boşluk boyutlarına, bunların dağılma şekline ve birbirleri ile bağlantı halinde bulunmasına bağlıdır. Porozimetre denilen alet ile kılcal boşlukların çapları ölçülmekte ve dağılma şekli saptanmaktadır.

Sertleşmiş betonda bulunan boşluk türleri şu şekilde sıralanabilir [42]:

- Çimento hidratasyonu ile ilgili olarak sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan jel boşlukları ve kapiler boşluklar
- Hava sürüklenmiş betonlardaki sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan hava kabarcıkları
- Taze betondaki terleme nedeniyle betondaki suyun yüzeye çıkma eğilimi sonucunda sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan boşluklar, ayrıca üst kısımlara hareket eden suyun iri agrega tanelerinin ve betonarme demirlerinin altlarında birikmesi nedeniyle oluşan boşluklar
- Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeni ile çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşabilecek boşluklar

- Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi işlemleri esnasında betonun içerisinde oluşan hapsolmuş hava boşlukları
- Agregatanelerinin yapısında bulunan boşluklar

2.9.4 Su Emme

Sertleşmiş beton içerisindeki boşluklar tamamen su ile dolu değilse, su içeren ortamlarda beton içerisine su girer ve boşluklar su ile dolar. Bu durum beton doygun hale gelene kadar devam eder. Betonun içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su çekilmesi olayına “su emme” denir.

Sertleşmiş betonun su emme işleminde, önce büyük boyutlu kapiler boşluklar ve daha sonra da küçük boyutlu kapiler boşluklar suyla dolu duruma gelmektedir. O nedenle, betondaki “su emme”, ilk zamanlarda büyük bir hızla, zaman ilerledikçe ise, giderek daha düşük bir hızla gerçekleşmektedir. Su emme hızı ve emilen suyun miktarı, betonun kuruluk derecesiyle ilgilidir [12].

Betonun emebileceği su miktarı, betondaki toplam boşluk hacmi ile doğrudan ilişki içerisinde. Toplam boşluk hacmi ise su/çimento oranı, agregatın cinsi, kür koşulları, kür süresi, karbonatlaşma, beton boyutu gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımı düşüktür.

2.9.5 Sünme

Malzemelerin üzerine uygulanan sabit gerilmelerin etkisiyle, zaman geçtikçe malzemenin gösterdiği deformasyona “sünme” denir. Betondaki sünme olayı düşük gerilmeler altında ve normal sıcaklık ortamında da meydana gelebilmektedir. Yük altında belirli bir deformasyon göstermiş olan beton, yük kaldırıldıktan sonra, hiçbir zaman ilk boyutlarına dönememektedir [21].

2.9.6 Büzülme (Rötre)

Betonun bünyesindeki suyun fiziksel ve/veya kimyasal yollarla uzaklaşması sonucunda betonun boyunda ve hacminde küçülme meydana gelmesine “büzülme” denir. Su

kaybının farklı yollardan oluşması nedeniyle büzülme aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir [46]:

- Isıl rötre
- Kuruma rötresi
- Plastik rötre
- Otojenik rötre
- Karbonasyon rötresi

BÖLÜM 3

CÜRUF

Entegre çelik işletmeleri çelik üretiminde hammadde, hava, su, yakıt ve enerji gibi temelde beş girdiyi değerlendirirler. Çelik üretiminde, üretilen ton çelik başına 2-4 ton atık meydana gelir. Bu atıkların büyük çoğunluğunu cüruf oluşturmaktadır. Çelik işletmelerinde oluşan katı ve sıvı atıklar Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Çelik işletmelerinde meydana çıkan katı ve sıvı atık türleri [7]

Katı/sıvı atıklar	Sıcak metal (kg/ton)
Kok tozu/çamuru	-
Yüksek fırın cürufu	340-421
Yüksek fırın tozu/çamuru	28
Sinter işletme çamuru	-
LD cürufu	200
LD çamuru	15-16
Hadde talaşı	22
Hadde çamuru	12
Refrakter, tuğlalar	11,6
Çamurlar/tozlar	-
Uçucu kül	-

Metalurjik cüruflar, yüksek fırın cürufu, çelikhane cürufu, fosfor cürufu, bakır cürufu ve pota cürufudur. Kimyasal ve mineralojik bileşimlerine bağlı olarak çimentolaştırıcı ve/veya puzolanik özelliğe sahip olabilirler. Günümüzde metalurjik cürufların birçoğu farklı uygulamalarda agrega olarak kullanılmaktadır [47].

Demir içeren cüruflar, metalurjik prosesler sonucu elde edilen silika veya alümina silikat içeren ürünlerdir. Demir içeren cüruflar yüksek fırın cürufu ve çelikhane cürufu olarak sınıflandırılır. Yüksek fırın cüruflarının ise eriyik haldeki cürufa uygulanan soğutma prosesine göre farklı sınıfları vardır. Bunlar, havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu, peletlenmiş cüruf, suyla taneleştirilen cüruf olarak sıralanabilir. Metal içermeyen cüruflar ise, bakır, nikel ve kurşun cüruflarıdır. Bakır ve nikel cürufları piro metalurjik prosesler sonucu konsantre sülfidlerden ayrıştırılan yan ürünlerdir [22].

3.1 Yüksek Fırın Cürufu

ASTM'ye göre yüksek fırın cürufu, "yüksek fırında demir ile eş zamanlı olarak eriyik halde elde edilen ve temel olarak kalsiyum ve diğer bazların silikat ve alümina silikatlarından oluşan, metalik olmayan bir ürün" olarak tanımlanmaktadır. Yüksek fırın cürufu granüle yüksek fırın cürufu ve havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu olacak şekilde iki tiptir.

Yüksek fırın cürufu, demir cevheri (manyetit veya hematit), demir peleti, kok, kireç ve dolomit gibi katkı maddelerinin yüksek fırında oksijen ile reaksiyona girerek demir cevherinin redüklenmesi sonucunda sıvı ham demir üretimi esnasında yan ürün olarak ortaya çıkmaktadır. Yüksek fırın cürufu, seramik cam, silika jel, tuğla gibi malzemelerin yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca kristalin ve amorf yüksek fırın cürufu, sulu çözeltilerden fosfatın geri kazanımında adsorbent olarak kullanıma da uygundur [7].

3.1.1 Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yüksek fırın cürufu inorganiktir. Temel olarak, silisyum oksit (%30-35), kalsiyum oksit (%28-35), magnezyum oksit (%1-6) gibi inorganik bileşenler içerir ve Al_2O_3/Fe_2O_3 oranı %18-25'dir. Düşük demir içeriğine bağlı olarak çimento endüstrisinde rahatlıkla kullanılabilir [7].

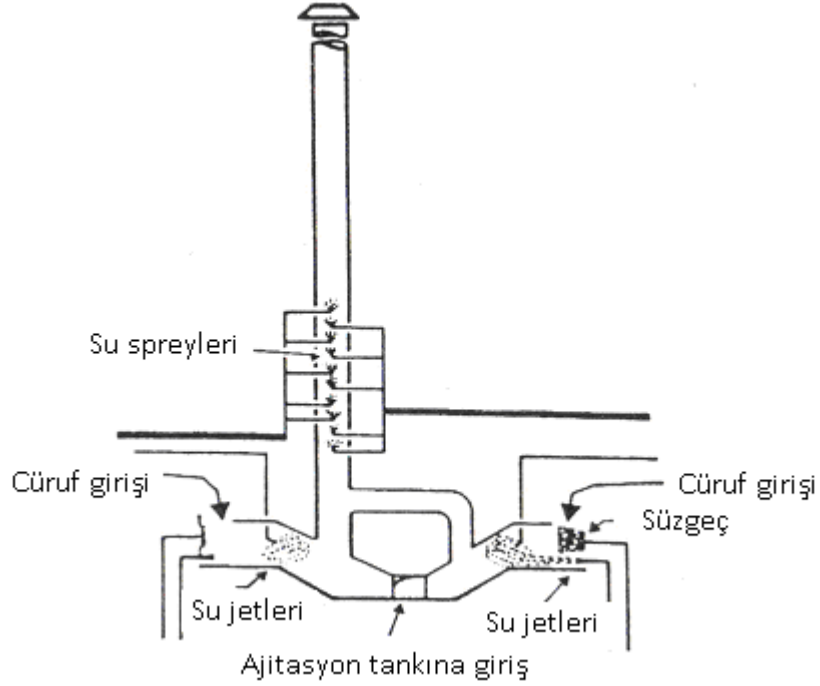
Çizelge 3.2 Yüksek fırın cürufu, klinker ve Portland çimentosunun kimyasal ve mineralojik bileşimi [7]

Bileşim (%)	Portland Çimentosu	Klinker	Yüksek Fırın Cürufu
KK	1,38	1,5	2,25
Çözünmeyen Kalıntı	1,18	0,5	-
SiO ₂	20,91	21,5	37,14
CaO	62,18	66,6	37,40
Al ₂ O ₃	5,82	5,2	9,15
Fe ₂ O ₃	3,40	2,8	1,05
MgO	2,36	1,0	11,70
SO ₃	2,78	1,0	0,37
Mineralojik Bileşim	C ₃ S-42-46, C ₂ S-25-27, C ₃ A-6-10, C ₄ AF-5-101	C ₃ S-54-62, C ₃ A-5-10, C ₂ S-20-22, C ₄ AF-10-13	-

Çelik işletmelerinde havada soğutulmuş ve granüle olmak üzere iki tip çelik cürufu bulunur. Çelik cürufunun spesifik gravitesi yaklaşık 2,90'dır ve kütleli yoğunluğu 1200-1300 kg/m³ arasında değişiklik gösterir. Granüle yüksek fırın cürufunun rengi beyazımsıdır. Granüle yüksek fırın cürufu çimento üretiminde kullanılırken havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu yol yapımında agrega olarak kullanılır. Çimento endüstrisinde yüksek fırın cürufu kullanılmasının faydaları; düşük hidratasyon ısı, uzun süreli dayanım, alkali-silika reaksiyonlarının kontrolü, aside karşı dayanım, daha iyi mukavemet olarak sıralanabilir.

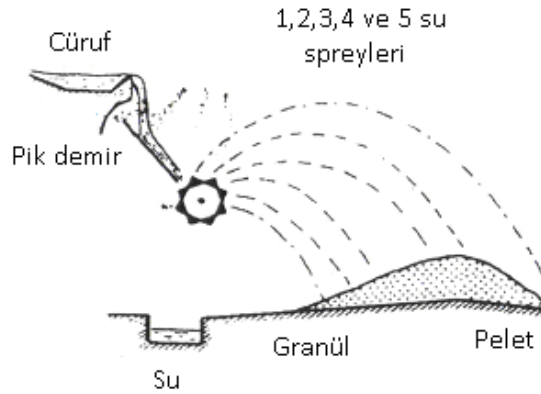
3.1.2 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun (ÖGYFC) Üretimi

Sıcak haldeki yüksek fırın cürufunun su ile soğutularak küçük parçalar halinde katılaşmasının sağlandığı yonteme "granülasyon yöntemi" denir. Granülasyon yönteminde 1 ton cüruf için yaklaşık 100 m³ su kullanılmaktadır. İşlem sonucunda cürufun bünyesinde yaklaşık olarak %30 oranında su kalır ve kalan su ya kurutucu değirmenlerde ya da filtreli havuzlarda cüruftan uzaklaştırılır.



Şekil 3.1 Granülasyon yöntemi [19]

Peletleme yönteminde ise su ile soğutulmuş cüruf dakikada 300 tur dönen bir tambur ile havaya fırlatılır. Peletleme yönteminde kullanılan su 1 ton cüruf için 1 m³'tür ve cürufun bünyesinde %10'dan daha az su kalır.



Şekil 3.2 Peletleme yöntemi [19]

Bu yöntemle üretilen cürufa "hafif cüruf" denir. Peletleme yöntemi sonucunda birkaç değişik boyda malzeme üretilir. Büyük boyutlu (4-15 mm) olanlar, çok gözenekli ve kısmen kristal bir yapıya sahiptir. Daha çok hafif beton agregası olarak kullanılabilirler. 4 mikrometreden küçük boyutlu olanlar ise camsı bir yapıya sahiptirler ve çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılırlar.

3.1.3 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Çimento ve Beton Üretiminde Kullanılması ve Betonun Özelliklerine Etkisi

ÖGYFC, beton üretiminde 3 farklı şekilde kullanılmaktadır:

- Beton katkı maddesi olarak
- Kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak
- Portland çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülerek “cürufu çimento” üretiminde

ÖGYFC’nun katkı maddesi olarak kullanıldığı betonlarda, betonun işlenebilirliğinin ve dayanımının arttığı, büzülmesinin ise azaldığı gözlenmiştir.

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi, cürufu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenmez [48].

Cürufu çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının daha az olduğu yönündeki genel kanıya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır. Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürufu çimentolarla portland çimentosu arasında önemli fark bulunmamaktadır [48].

Yapılan deneysel çalışmalarda cürufu çimento kullanılarak üretilmiş betonların terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır [48]. ÖGYFC, betonun soğuk havalarda priz alma süresini uzatmakta, daha fazla hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç oluşturmakta ve erken yaşlardaki beton dayanımı artışını azaltmaktadır [19].

3.1.4 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Hidratasyonu

Granüle yüksek fırın cürufu ile su arasında meydana gelen reaksiyon, portland çimentosunun hidratasyonu ile karşılaştırıldığında daha yavaş gerçekleşmektedir. Cürufun hidratasyonu cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate silika alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cüruf

hidratasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer, daha sonra, ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alüminat konsantrasyonunda, hidrate alüminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür. Yüksek fırın cürufu hamurlarındaki hidrate fazların belirlenmesine yönelik bir araştırmada $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ dörtlü sisteminde C-S-H, C_2ASH ve C_4AH bileşenlerinin oluştuğu saptanmıştır [48].

3.2 Çelikhane Cürufu

ASTM Standart Enstitüsü çelikhane cürufunu, temel oksijen fırınında veya elektrik ark ocağında çelik üretimi ile eş zamanlı olarak eriyik halde elde edilen ve temel olarak demir, alüminyum, mangan, kalsiyum ve magnezyumun oksitleri ile birleşmiş halde kalsiyum silikatlar ve ferritlerden oluşan ve metalik olmayan bir ürün olarak tanımlar.

Oksijenle çelik üretiminde (BOF) kullanılan hammaddeler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Sıvı pik demir
- Hurda ve soğutucular
- Cüruf yapıcılar

Yüksek fırından alınan sıvı metal, torpido veya transfer potası ile çelikhaneye taşınır. Genellikle üstü açık transfer potaları yerine, ısı izolasyonunun daha iyi olduğu torpidolar taşımacılıkta tercih edilir. Yüksek fırın döküm sıcaklığı $1482\text{-}1537^\circ\text{C}$ kadardır. Sıvı ham demir bazik oksijen fırınına şarj edilene kadar geçen sürede yaklaşık 95°C sıcaklık kaybına uğrar. BOF'na şarjdan önce sıcaklık ölçümü, sıcak metal şarj potasına torpidolardan sıvı pik boşaldıktan sonra ısı çifti ile yapılır. Sıcak metal bileşimi, şarj pratiğini, cüruf yapıcı miktarını ve cüruf bileşimini etkileyeceğinden önemlidir. Geniş aralıklı sıcak metal bileşimi şu şekildedir: %3,7-4,4 C, %0,4-2,5 Mn, %0,3-1,7 Si, %0,03-0,08 S, max. %0,30 P. Sıvı metal konvertere beslenir. Konvertere hurda ve soğutucular ilave edilir. Hurda ilave edilmesinin nedeni hem malzemenin geri dönüşümünü sağlamak hem de fazla ısıyı almaktır. Sıcak metalde Fe, C, Mn, Si ve P'nin oksijen ile yakılmaları sonucu oldukça fazla miktarda ısı açığa çıkar. Bu durum fırın astarını olumsuz yönde etkilediği gibi, metal banyo sıcaklığını da döküm için elverişsiz bir değere yükseltir. Bu nedenle BOF yönteminde bu fazla ısı, soğutucular kullanılarak

alınmaya çalışılır. Soğutucu veya hurda kullanımının bir başka amacı da, konverter döküm tonajını artırmaktır. En yaygın olarak kullanılan hurdalar çelik veya pik hurdalarıdır. Konvertere şarj oranı sıcak metal %Si oranına bağlı olarak değişir.

Büyük hacimli fırınlarda ısı kaybının, küçük hacimlilere göre az oluşu daha fazla hurda eritebilme olanağı sağlar. Bu nedenle büyük fırınlarda hurda şarj oranı küçüklere göre daha fazladır.

Konvertere ilave edilen diğer ana madde ise cüruf yapıcılarıdır. Safsızlıkları ve oksitlenen elementleri toplayan, dekarburizasyonu hızlandıran cüruf, çelik yapımının vazgeçilmez bir unsurudur. İyi bir çelik, iyi bir cüruf ile elde edilebilir. BOF yönteminde cüruf oluşma hızı oldukça yüksektir. Dolayısıyla uygun cüruf yapıcıların seçilmesi önemlidir. Genel olarak BOF'da kullanılan cüruf yapıcılar şunlardır: yüksek CaO'lu kireç, dolomitik kireç, florspar ve benzeri cüruf yapıcılar.

Sıvı metal, hurda ve cüruf yapıcı konverterde karıştırıldıktan sonra, konverter içerisine daldırılan bir lans aracılığı ile yüksek basınçta oksijen gazı beslenir. BOF yönteminde C, Mn, P, Si oksijenle reaksiyona girer ve oksitlenerek metal banyosundan uzaklaşırken kükürt de cüruf yapıcılara bağlanır. İşlem bittiğinde sıvı çelik bir potaya dökülürken, oluşan cüruf sıvı halde, yaklaşık olarak 1100-1500°C'de özel cüruf potalarına boşaltılarak taşınmakta ve stok sahalarında soğumaya bırakılmaktadır. Bir ton çelik üretiminde yaklaşık olarak 100-150 kg (%10-%15) cüruf oluşmaktadır.

BOF'da iki tip oksitlenme reaksiyonu meydana gelir: doğrudan oksijen ile temasla ve FeO'nun metal banyosuna oksijen vermesi ile. Üflenen oksijenin doğrudan metal ile temas ettiği bölgede sıcaklık 2000-2500°C'a ulaşır. Bu yüksek sıcaklıkta, gaz-metal emülsiyonunda hızlı oksitlenme reaksiyonları oluşur. Si, Mn, P, C ve Fe'nin bir kısmı oksitlenir. Oksitlenen demirin (FeO), metal banyosuna oksijen vermesi ile oksitlenme reaksiyonları devam eder. Çelik üretim biçimi ne olursa olsun, reaksiyonlar gaz-cüruf-metal fazlarında oluşur. Özellikle cüruf bileşimi reaksiyonların gelişmesini etkiler. BOF cürufunun temel bileşeni CaO'dur (yaklaşık %40-50).

Cüruf bazikliği ve cüruf oksitlenme düzeyi, oksitlenme reaksiyonları ve çelik üretimi açısından önemlidir. Bazik oksitlerin asit oksitlere oranı cürufun bazikliğini gösterir. SiO₂, P₂O₅, Al₂O₃ gibi kafes yapı oluşturan anyon kompleksler asit oksit, CaO, MgO,

MnO, FeO gibi kafes yapısını bozarak değiştiren oksitler bazik oksitlerdir. Basit cürufta yani SiO₂ ve CaO'nun temel olduğu cürufta $V = \frac{\%CaO}{\%SiO_2}$ oranı bazikliği verir. Fakat endüstride bu iki temel cüruf bileşeninden başka MgO, P₂O₅ gibi oksitler de bulunduğundan cüruf bazikliği $V = \frac{(\%CaO + 1,4\%MgO)}{(\%SiO_2 + 0,84\%P_2O_5)}$ şeklinde ifade edilebilir. Cürufun FeO oranı da çelik yapımı için oldukça önemlidir. Oksitlenme düzeyi, oksitlenme reaksiyonlarını hızlandırıcı niteliktedir. 1600°C'da FeO doymuş sıvı demir %0,23 oranında oksijen içermektedir.

3.2.1 elikhane Cürufunun Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik zellikleri

Fiziksel olarak elikhane cürufları, koyu gri renkte, tane şekli köşeli ve yüzeyi pürüzlü bir görünüşe sahiptirler. Yüksek fırın cürufuna kıyasla çok sert ve dayanıklıdırlar. zgl ağırlıkları ise %20-%25 daha büyüktür.

elik cürufu, demir elik üretim prosesi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Kullanılan hammaddeler ve uygulanan ergitme prosesi elik cürufunun özelliklerini belirler. elik cürufunun kimyasal bileşimi %45-60 CaO, %10-15 SiO₂, %1-5 Al₂O₃, %3-9 Fe₂O₃, %3-13 MgO, %7-20 FeO şeklindedir. Kimyasal bileşim, elik cürufunun hidrolik aktivitesini belirlemek için çok önemli bir parametredir. Baziklik, $A = \frac{CaO}{(SiO_2 + P_2O_5)}$ elik cürufunun hidrasyon aktivitesini belirlemek amacıyla kullanılabilir [49]. Bazikliklerine göre elik cürufları 4 farklı gruba ayrılmıştır; olivin grup ($A = 0,9-1,4$), mervinit grup ($A = 1,4-1,6$), dikalsiyum silikat grup ($A = 1,6-2,4$) ve trikalsiyum silikat grup ($A > 2,4$). Bunlar arasında sadece $A > 1,8$ olan cüruflar imento malzemesi olarak kullanılabilir [50].

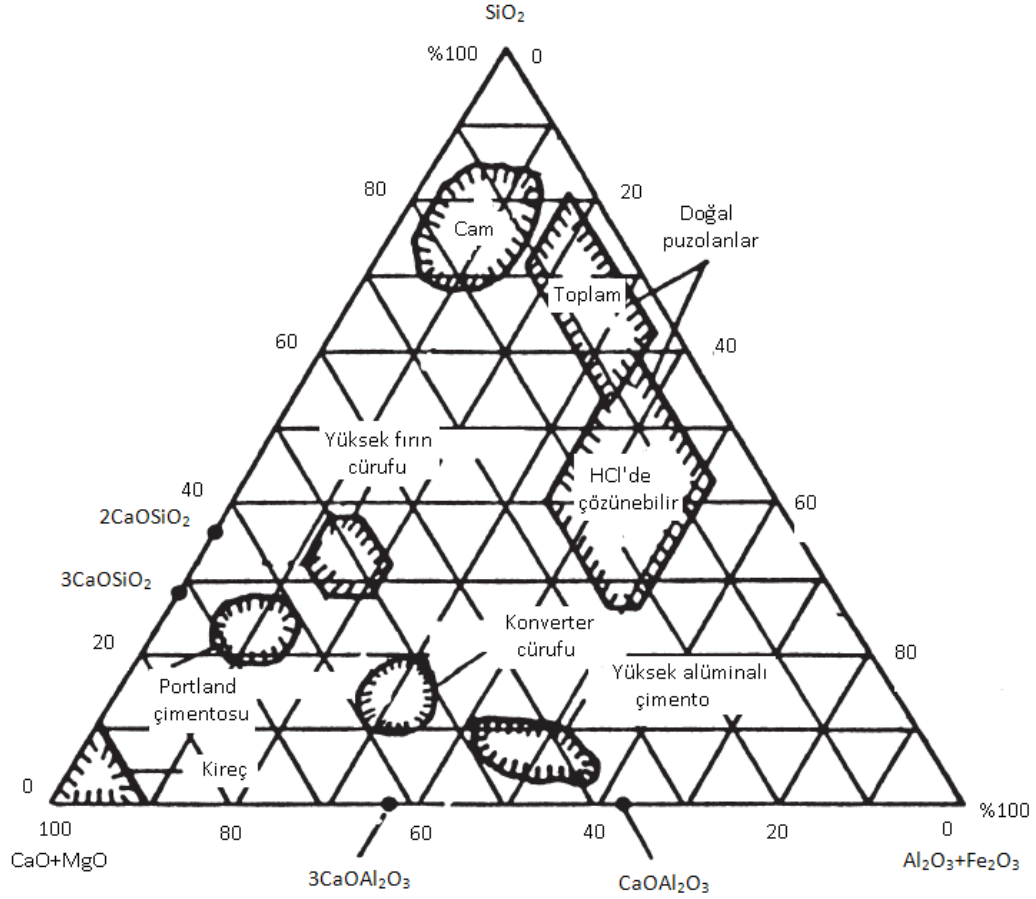
Bazik oksijen fırını elik cürufunun mineral yapısında olivin, mervinit, dikalsiyum silikat (C₂S), trikalsiyum silikat (C₃S), tetrakalsiyum alüminaferrit (C₄AF), dikalsiyum ferrit (C₂F), CaO-FeO-MnO-MgO katı zeltisi (RO fazı) ve serbest CaO bulunur. C₂S, C₃S, C₄AF ve C₂F fazlarının bulunması elik cürufunun çimentolaşma özelliklerini destekler. Ancak, elik cürufundaki C₂S ve C₃S'in aktivitesi Portland çimentosundan daha düşüktür çünkü soğutma prosesinin hızı daha yavaştır. elik cürufu içeren çimentoların su ihtiyaı daha azdır ve daha uzun priz süresine sahiptirler. elik cürufunun uygun oranlardaki ilavesi ile betonun mekanik özellikleri geliştirilebilir.

Çizelge 3.3 Çelikhane cürufunda bulunan temel fazlar [7]

Fazlar	% Ağırlık
Trikalsiyum Silikat (C_3S), Ca_3SiO_5	0-20
Dikalsiyum Silikat (C_2S), Ca_2SiO_4	30-60
Diğer Silikatlar	0-10
Magnezyokalsiyowüstit	15-30
Dikalsiyum Alüminaferrit ($Ca_2(Fe, Al, Ti)_2O_5$)	10-25
Magnezyum Tipi Faz (Fe, Mn, Mg, Ca) O	0-5
Kireç Fazı (Ca, Fe) O	0-15
Periklas (Mg, Fe) O	0-5
Florit CaF_2	0-1

3.2.2 Çelikhane Cürufunun Değerlendirilmesi

Çelikhane cüruflarının değerlendirilmesi amacıyla yapılan bilimsel araştırmalar sonucunda çelikhane cüruflarının özellikle karayollarında ve demiryollarında, çimento sanayinde, tarımda ve cüruf yünü imalatında, konvansiyonel malzemelerin yerine kullanılabildiği ortaya çıkmıştır. Temel ve temel altı malzemesi, toprak seti, dolgu, ana yol banketleri ve sıcak asfalt karışımları uygulamalarında agrega olarak çelik cürufunun kullanımı artık standart bir uygulama haline gelmiştir. Bu alanlarda kullanılmadan önce, uygulama alanına ilişkin özellikleri sağlaması amacıyla çelik cürufları kırılarak elenmelidir. Hidratasyonun sebep olduğu genleşmeyi önlemek amacıyla yaşlandırma prosesi uygulanmalıdır. Çelikhane cürufları, serbest kireç ve nadir elementler içerdiğinden toprağın koşullandırılmasında da kullanılabilmektedir. Çelikhane cürufları sert yapıları nedeniyle yolların taban ve alt taban uygulamaları için uygundur. Çelikhane cürufunun mineralojik ve fiziksel özellikleri üzerine yapılan çalışmalar çelikhane cürufunun iyi bir yol malzemesi olduğunu ispatlamıştır. Ayrıca, çelikhane cürufu demir yolu raylarında balast malzemesi olarak da kullanılabilir [7].



Şekil .3.3 Yüksek fırın ve çelikhane cüruflarının Portland çimentosuyla karşılaştırılan bileşimleri [6]

Portland çimentosu ile birlikte beton üretiminde yüksek fırın cürufunun kullanımı yaygın olmakla birlikte çelikhane cürufunun da kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Monshia ve Asgaranib, çelikhane cürufunun portland çimentosu üretiminde kullanımına yönelik yaptıkları çalışmada cüruf bileşimlerini Şekil 3.3'deki diyagram aracılığıyla açıklamışlardır.

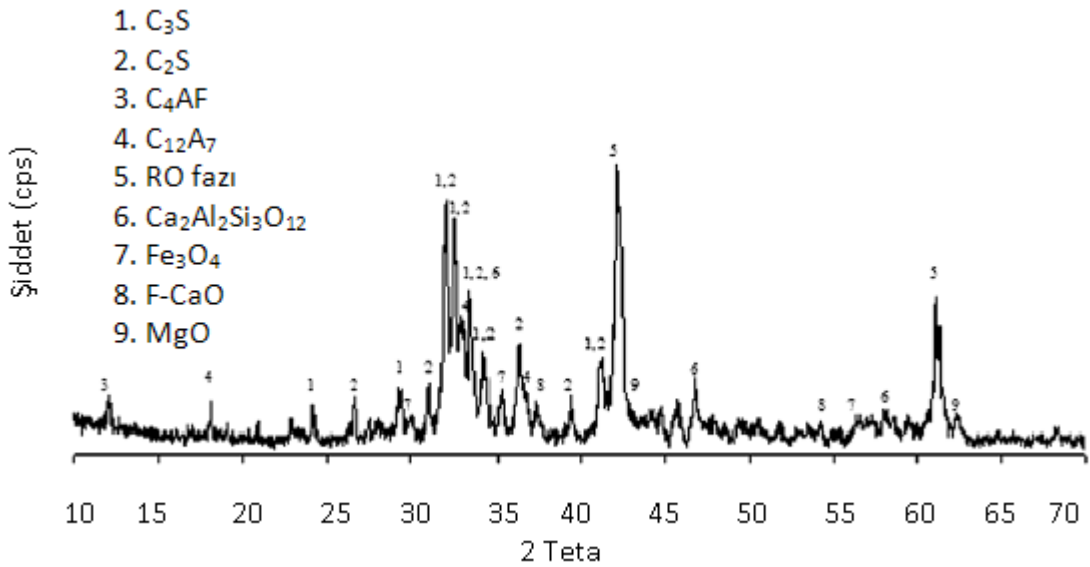
Cürufların beton üretiminde agrega olarak kullanılmasına dair TS 706 EN 12620 standardı, cüruf agregası için bazı sınırlamalar belirtmiş ve kullanımına dair kabul kriterleri sunmuştur.

DAHA ÖNCE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, çelikhane cürufunun özelliklerinin incelenmesine ve değerlendirilmesine yönelik olarak yapılan bilimsel çalışmalara yer verilmiştir.

4.1 Bazik Oksijen Fırını Çelik Cürufunun Hidratasyon Özellikleri

Bu çalışma, 2010 yılında Qiang ve Peiyu tarafından yapılmıştır. Çalışmanın amacı, bazik oksijen fırını çelik cürufunun hidratasyon özelliklerini incelemektir. Çalışmada hammadde olarak bazik oksijen fırını çelik cürufu kullanılmıştır. Mason'un baziklik hesaplama yöntemine göre numunenin bazikliği 2,37 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1 Çelik cürufunun X-ışını kırınımı [49]

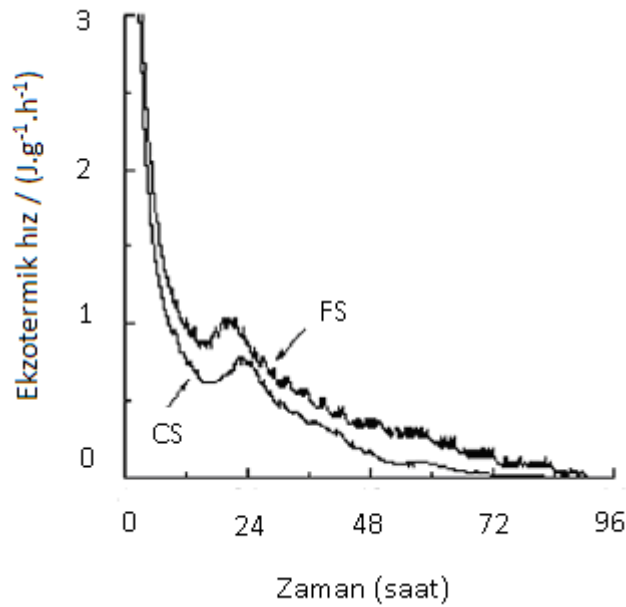
Çizelge 4.1. Çelik cürufunun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) [49]

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO+Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O _{eq}	KK
17,09	4,53	23,86	40,46	10,46	0	0,42	0,91

Not: Na₂O_{eq}=Na₂O+0,658K₂O

Hidratasyon Hızı

Çelik cürufu, pH'ı 13 olan sodyum hidroksit çözeltisi su ile karıştırılarak çelik cürufu karışımları oluşturulmuştur. Su/çelik cürufu veya sodyum hidroksit/çelik cürufu oranı ağırlıkça 0,3 olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Yaşlandırmanın 1, 3, 7, 28 ve 90. günlerinde, hidratasyon işlemi, numunelerin asetona batırılması ile sonlandırılmıştır.



Şekil 4.2 Farklı parçacık boyutuna sahip çelik cürufu numunelerinin hidratasyonu esnasında meydana gelen ısı değişimleri [49]

Analiz sonuçlarından çelik cürufu ve çimentonun hidratasyon prosesinin benzer olduğu görülmektedir. C₂S ve C₃S, çelik cürufundaki ana aktif bileşenlerdir fakat aktiviteleri çok düşüktür. Ancak bu bileşenler çelik cürufunda çimentoya göre daha az oranda bulunduğu için, çelik cürufu düşük aktiviteye sahip çimentolaştırıcı madde olarak kabul edilebilir. Çelik cürufunun parçacık boyutu azaldıkça prosesin başlangıcındaki hidratasyon oranının arttığı söylenebilir. Mekanik öğütme mineral kristal kafeslerinin yerleşimini etkiler ve çelik cürufunun parçacık boyutunu azaltır. Parçacıkların yüzey

alanını artırarak çelik cürufunun hidratasyonunu hızlandırmak uygulanabilir bir yöntemdir.

Buharlaşamayan Su İçeriği (w_n)

Pulverize haldeki numuneler fırında 65°C’de 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra döner fırına alınmıştır ve 1000°C’de 2,5 saat bekletilmiştir. İki sıcaklık arasındaki kütle kaybı bulunarak buharlaşamayan su miktarı belirlenmiştir. Yapılan deneyler farklı yaşlandırma sıcaklıklarındaki w_n içeriklerinin yaşlandırmanın ilk 7 gününde fazla olduğunu, yaşlandırma süresi arttıkça azaldığını göstermektedir.

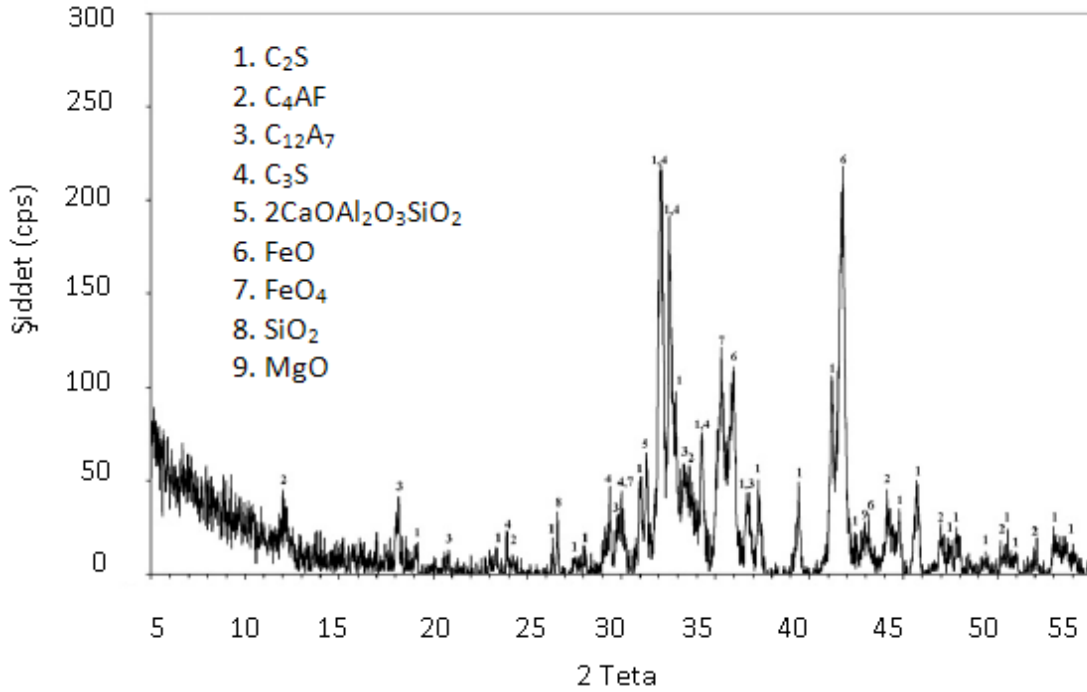
Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Çelik cürufunun hidratasyon prosesi 5 aşamada gerçekleşmekte olup, çimentonun hidratasyon prosesine benzer özelliktedir. Çelik cürufu, düşük aktiviteye sahip çimentolaştırıcı bir madde olarak kabul edilebilir.
- Yaşlandırmanın ister başlangıcında ister sonunda olsun, mekanik öğütme ile çelik cürufunun spesifik yüzey alanı artırılarak çelik cürufunun hidratasyon hızı artırılabilir.
- Hidratasyon ortamının pH değerini artırmak ilk 28 gün içerisinde hidratasyon hızını artırır, ancak ilerleyen zamanda etkisini kaybeder.
- Yaşlandırma sıcaklığını artırmak başlangıçta çelik cürufunun hidratasyonunu hızlandırmaktadır, ancak daha sonra hız düşmeye başlamaktadır ve bu durum ince malzemelerde daha net olarak fark edilmektedir.
- C_3S ve C_2S çelik cürufunun temel aktif bileşenleridir. CSH jel ve $Ca(OH)_2$ çelik cürufunun en önemli hidratasyon ürünleridir. C_3S ve C_2S ’in bir kısmı çok düşük aktiviteye sahiptir ve hidratasyona uğramadan kalır veya 90 gün sonra çok az reaksiyona girer. RO fazı hemen hemen inerttir. RO fazı ve CSH jeli arasındaki ara faz sistemin zayıf bölgesidir.

4.2 Çelik Cürufunun Portland Çimentosu Klinkeri Üretiminde Kullanılması

Tsakiridis vd., çelik cürufunun Portland çimentosu klinkeri üretiminde hammadde olarak kullanımının araştırılması amacıyla, iki numune üzerinde (normal bileşime sahip

referans numune ((PC)_{ref}), diğeri %10,5 çelik cürufu içeren numune ((PC)_{S/S}) deney yapmıştır. Üretilen klinkerler XRD ve optik mikroskop ile kimyasal ve mineralojik olarak incelenmiştir. Daha sonra klinkerler alçı taşı ile karıştırılmıştır.



Şekil 4.3 Kullanılan çelik cürufunun X-ışını kırınımı [53]

Çelik cürufu, ((PC)_{S/S}) üretiminde kullanılacak hammadde karışımını hazırlamak amacıyla uygun oranlardaki kireç taşı, çamur, kum, boksit gibi diğer hammaddelerle karıştırılmıştır. Çelik cürufu içermeyen referans numune ((PC)_{ref}) karşılaştırma yapabilmek amacıyla sentezlenmiştir.

Uygulanan sinterleme prosesi tüm çimento klinkerlerine uygulanabilen ortak bir yöntemdir. Hammadde karışımı çapı 2 cm olan küçük küreler halinde şekillendirilmiştir ve 110°C’de kurutulmuştur. Daha sonra 500°C’deki fırına yerleştirilmiştir, sıcaklık 1000°C’ye kadar artırılmış, numuneler 30 dakika bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Sonra, sıcaklık 1450°C’ye kadar çıkarılmıştır ve numuneler bu sıcaklıkta 30 dakika daha bekletilmiştir. Sinterleme prosesinin sonunda γ -C²S oluşumunu engellemek için numuneler hızlıca soğutulmuştur. Üretilen klinker numuneleri XRD ve optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir.

Numunelerin standart yoğunluğu, priz süreleri ve sağlamlıkları EN 196-3'e göre belirlenmiştir. 40mm×40mm×160mm boyutlardaki numunelerle 2, 7, 28, 90 günlük sürelerde, EN 196-1'e göre basma dayanımı ölçümleri yapılmıştır.

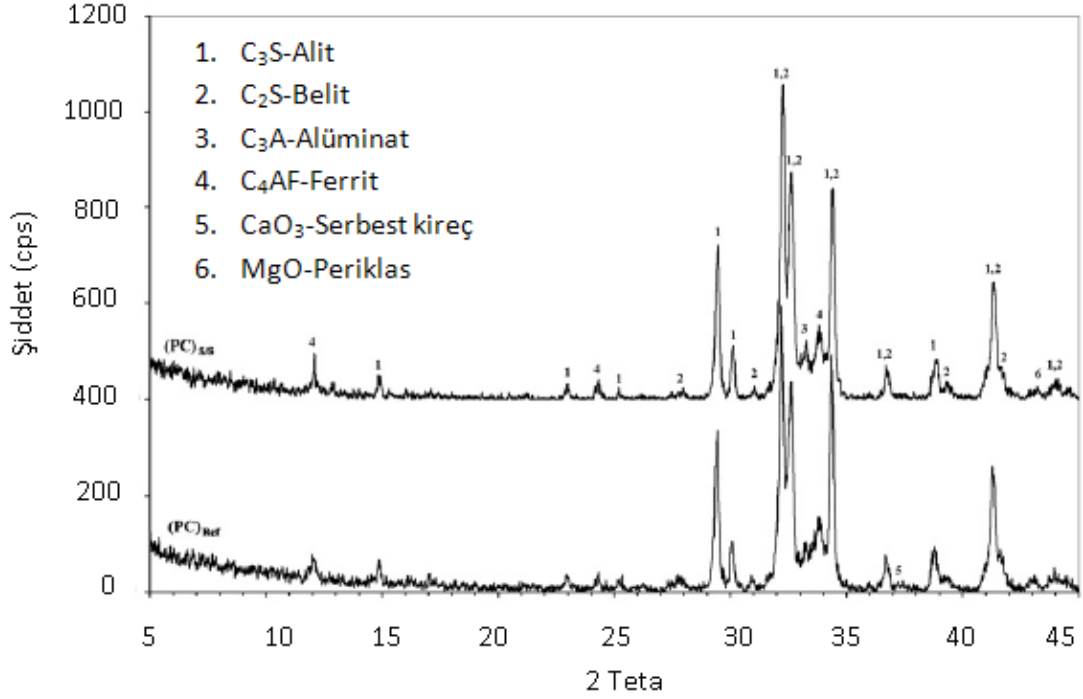
Kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri Çizelge 4.2'de verilmektedir. Buna bağlı olarak, bir bilgisayar yazılım programı yardımıyla iki hammadde karışımının sentezi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2 Portland çimentosu klinkeri üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri [53]

Oksitler	Hammaddelerin İçeriği (%)				
	Kireç Taşı	Kum	Çamur	Boksit	Çelik Cürufu
SiO ₂	0,25	81,13	60,53	3,11	17,53
Al ₂ O ₃	0,08	8,34	14,30	52,35	6,25
CaO	55,06	0,58	7,23	7,64	35,70
MgO	0,12	1,10	0,80	0,09	6,45
K ₂ O	0,02	1,63	0,78	0,76	0,26
Na ₂ O	0,01	0,14	1,18	0,15	0,2
TiO ₂	-	0,33	0,47	1,35	0,76
MnO	-	-	-	-	2,50
ZnO	-	-	-	-	0,85
KK ₁₀₀₀	43,37	3,26	9,62	11,35	2,24

Çizelge 4.3 Portland çimentosu klinkeri üretiminde kullanılan hammadde karışımlarının bileşimi [53]

Hammadde Karışımları	Hammadde Karışımlarının Bileşimi (%)				
	Kireç Taşı	Kum	Çamur	Boksit	Çelik Cürufu
(PC) _{Ref}	78,00	14,40	3,70	3,90	-
(PC) _{S/S}	70,80	12,70	3,50	2,50	10,50



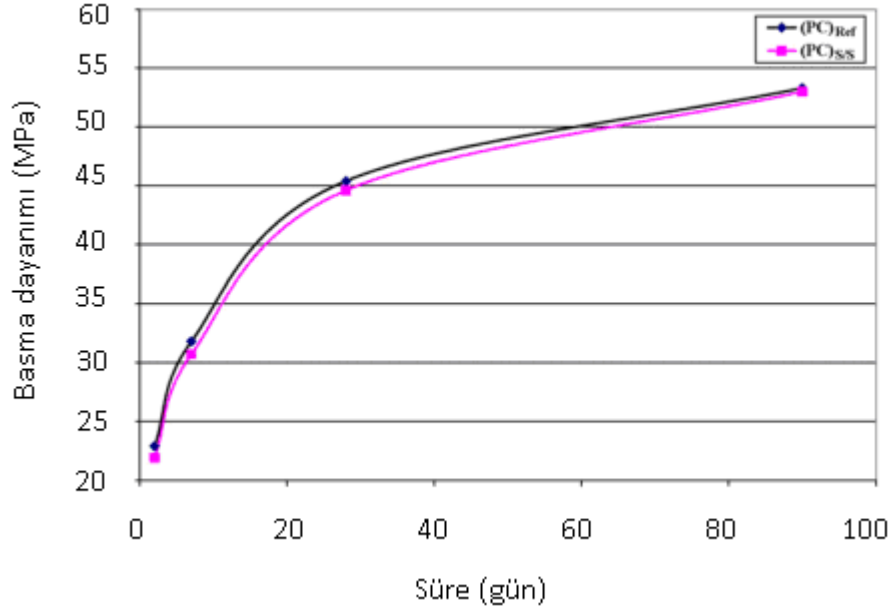
Şekil 4.4 Çelik cürufu içeren ve içermeyen Portland çimentolarının XRD analizi [53]

Hammadde karışımında çelik cürufu kullanımı, standart kıvamı elde etmek için gerekli su miktarını ve priz süresini etkilemektedir. Le Chatelier prensibine ve EN 197-3'e göre limit değer 10 mm iken genleşme miktarı 2,0-2,5 mm arasında değişmektedir.

Çizelge 4.4 Çimento numunelerinin fiziksel özellikleri [53]

Fiziksel Özellikler	(PC) _{Ref}	(PC) _{S/S}
Başlangıç Zamanı	150	170
Bitiş Zamanı	180	205
Normal Kıvamdaki Su Miktarı (%)	26,8	26,1
Genleşme	2,5	2,0

Çelik cürufu kullanılarak hazırlanan karışımlar 2, 7, 28 ve 90 günlük süreler sonunda basma dayanımlarını belirlemek amacıyla test edilmiştir. Bütün karışımlar birbirine yakın dayanım değerleri göstermiştir. Bu durum çelik cürufunun çimento içerisinde kullanılabilirliğini desteklemektedir.



Şekil 4.5 Çimento numunelerinin basma dayanımları [53]

2, 7, 28 ve 90 günlük sürelerle hidrasyona uğratılmış çimento numunelerinin XRD analizinde, etrenjit ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$), CSH ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ difraksiyon piklerinin hidrasyon esnasında oluştuğu görülmüştür. Hidrasyon prosesinin devamında ise, özellikle 90 gün sonunda, C_3S ve C_2S fazlarına ait pikler kısılmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda, Portland çimentosu üretiminde %10,5 oranında çelik cürufu kullanılmasının hidrasyonu ve sinterlemeyi etkilemediği tespit edilmiştir.

Çelik cürufu içeren numunenin aşağıdaki özellikleri gösterdiği belirlenmiştir:

- Alit fazı küçük, iyi şekillenmiş kristaller olarak meydana çıkmıştır. Belit kristalleri, alit kristalleri ile bağlantılı olarak dağılmıştır, bu durum klinkerleşme reaksiyonun alit doğrultusunda meydana geldiğini ve hammadde karışımının homojen olduğunu göstermektedir.
- Sıvı faz katılaşma sonrasında iyi şekillenmiş, eş boyutlu kristaller meydana getirmiştir.
- Priz süresi, su ihtiyacı ve genleşme miktarı değerleri referans Portland çimentosu değerlerine yakın değerler olarak elde edilmiştir.
- Basma dayanımı değerleri hidrasyon esnasındaki referans numunenin basma dayanımı değerine yaklaşık bir değer olarak elde edilmiştir.

4.3 Demir-Çelik Cürufu ve Kireç Taşından Portland Çimentosu Üretimi

Monshia ve Asgaranib 1999 yılında yaptıkları çalışmada; yüksek fırın ve çelikhane cürufalarını manyetik ayırma sonrasında altı farklı bileşimdeki kireç taşı ile karıştırarak çimento üretimi gerçekleştirmiştir. Hammaddeler, pilot ölçekli döner fırında 1350°C’de 1 saat yakılmıştır. Klinker soğutulup, öğütülmüş ve %3 oranında alçı taşı ile karıştırılmıştır. Başlangıç ve bitiş priz süreleri, standart hamurun kıvamı, sağlamlık, serbest kireç, basma ve kırılma dayanımları 3, 7 ve 28 günlük süreler için ölçülmüştür.

Çizelge 4.5 Yüksek fırın cürufu numunelerinin analizi [54]

Ağırlıkça %	Birinci Yüksek Fırın		İkinci Yüksek Fırın		Açık Hava Deposu
	Min.	Max.	Min.	Max.	
CaO	32,60	35,08	32,49	35,91	39,50
SiO ₂	32,83	36,80	32,16	34,59	36,40
Al ₂ O ₃	9,08	9,84	9,15	9,90	4,55
Fe ₂ O ₃	0,77	1,50	0,77	1,49	0,41
MgO	10,46	11,93	10,58	12,05	6,99
MnO	0,58	1,88	0,49	1,57	0,82
S	1,05	1,19	1,08	1,23	1,18
TiO ₂	4,05	4,81	3,94	5,10	4,77
V ₂ O ₅	0,10	0,17	0,09	0,25	-
Na ₂ O+K ₂ O	-	0,15	-	0,16	0,91

Çizelge 4.6 Farklı üç kaynaktan elde edilen ve çalışmalarda kullanılan yüksek fırın cürufunun analizi (ağırlıkça %) [54]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	S	TiO ₂	V ₂ O ₅	Na ₂ O+K ₂ O
37,2	36,2	8,0	0,7	10,3	0,9	1,5	4,7	0,1	0,4

Çizelge 4.7 Manyetik ayırma yapılmış çelikhane cürufunun analizi (ağırlıkça %) [54]

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	S	TiO ₂	V ₂ O ₅	Na ₂ O+K ₂ O
56,4	10,4	2,0	21,0	1,7	2,5	0,2	3,1	2,4	0,3

Çizelge 4.8 Kireç taşı analizleri [54]

Numune No	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Na ₂ O+K ₂ O (%)	KK (%)
1	51,42	4,24	0,55	0,39	1,63	0,33	41,12
2	52,10	3,13	0,30	0,31	1,75	0,23	42,12
3	51,90	3,67	0,36	0,26	1,01	0,26	42,24
4	51,94	4,12	0,47	0,39	1,12	0,37	41,57
5	51,35	3,95	0,57	0,35	1,37	0,37	41,65
6	52,12	4,01	0,46	0,36	1,07	0,37	41,69
7	49,22	8,07	1,13	0,80	1,27	0,29	39,11
8	52,14	3,33	0,36	0,24	0,98	0,26	42,34
9	51,46	4,26	0,46	0,34	1,06	0,26	41,86
10	50,45	3,68	0,55	0,33	0,97	0,38	41,85
11	50,26	3,98	0,45	0,31	1,00	0,26	41,82
12	50,25	5,23	0,38	0,51	1,10	0,27	41,51
13	50,75	4,45	0,49	0,32	0,99	0,27	41,68
14	50,70	4,40	0,50	0,40	1,00	0,30	41,60

Her üç bileşenden hangi miktarda kullanılacağını belirlemek amacıyla bilgisayar programı geliştirilmiştir. Kireç doygunluk faktörü (LSF), silika oranı (SR) ve alümina

oranı (AR) dikkate alınmıştır. LSF; $100(\text{CaO} + 1,5)/(2,85 \text{SiO}_2 + 1,18 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65 \text{Fe}_2\text{O}_3)$ şeklinde, SR; $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ şeklinde, AR; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ şeklinde hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9 Altı farklı karışımın bileşimi ve analizi [54]

Numune No	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
Kalsine Kireç (%)	28,0	36,0	43,0	28,0	31,0	51,0
Demir Cürufu (%)	48,0	51,0	49,0	54,0	42,0	49,0
Çelik Cürufu (%)	24,0	13,0	8,0	18,0	27,0	0,0
Kireç Taşı (%)	40,0	49,0	57,0	40,0	44,0	64,0
Demir Cürufu (%)	40,0	41,0	0,37	45,0	34,0	36,0
Çelik Cürufu (%)	20,0	10,0	6,0	15,0	22,0	0,0
Hesaplanan Kimyasal Analiz Değerleri						
CaO (%)	56,0	57,9	60,5	54,8	58,0	63,0
SiO ₂ (%)	21,9	22,4	21,7	23,5	20,3	21,5
Al ₂ O ₃ (%)	4,6	4,7	4,5	4,9	4,2	4,4
Fe ₂ O ₃ (%)	5,5	3,3	2,3	4,3	6,2	0,7
MgO (%)	5,9	6,2	6,0	6,4	5,4	6,1
Diğerleri (%)	6,1	5,5	5,0	6,1	5,9	4,3
LSF	80,5	83,0	90,3	74,8	89,0	96,0
SR	2,3	2,8	3,2	2,5	2,0	4,2
AR	0,8	1,4	2,0	1,1	0,7	6,3
Ölçülen Kimyasal Analiz Değerleri						
CaO (%)	54,2	58,2	58,7	57,7	58,4	61,8
SiO ₂ (%)	19,9	19,9	19,9	20,9	17,9	18,3
Fe ₂ O ₃ (%)	5,4	3,0	2,6	3,8	6,6	1,5
MgO (%)	5,9	4,8	5,1	6,0	6,6	5,8

Çizelge 4.10 Üretilen çimentoların fiziksel özellikleri ve X-ışını kırınımı ile yapılan yarı nicel faz analizi [54]

Numune No	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
İncelik (Cm ² /G), Blaine Yöntemi, ASTM C204-84	3662	3397	3801	3619	4053	5453
Harç Kıvamı (% Su)	23,6	26,4	25,4	24,3	24,4	28,0
Priz Süresi (dak), ASTM C191-82						
Priz Başlangıcı	136	165	113	15	25	51
Priz Bitişi	249	265	196	33	65	65
Sağlamlık Genleşmesi (mm), ASTM C151-84	0	0	2	1	1	41,5
Serbest CaO (%)	0,6	0,4	1,4	0,3	0,4	7,3
Basma Dayanımı (kg/cm ²), ASTM C150-86						
3 gün	12,5	16,7	156,3	18,8	100,0	139,6
7 gün	16,5	22,9	204,2	25,0	116,7	166,7
28 gün	20,8	91,7	362,5	33,3	256,3	312,5
Kırılma Dayanımı (kg/cm ²), ASTM C348-80						
3 gün	-	-	37,0	-	22,0	39,0
7 gün	-	-	50,0	-	29,0	42,0
28 gün	-	24,0	62,0	-	51,0	58,0
Endüstriyel Ürünle Karşılaştırıldığındaki Faz Miktarı (Eğimlerin Oranı Yöntemi)						
C ₃ S	-	0,45	0,91	0,45	1,0	1,09
C ₂ S	-	0,70	0,55	0,55	0,52	0,52
C ₃ A	-	1,09	0,66	0,42	0,54	0,45
C ₄ AF	-	0,60	1,0	1,0	0,80	0,60

Yapılan çalışma sonucuna göre; M₃, M₅ ve M₆ numuneleri iyi mekanik özellikler göstermiştir. Bu bileşimlerde alit fazının ve LSF oranının yüksek olduğu ve C₃S'in iyi geliştiği görülmüştür. Numune M₆'da hiç cüruf katkısı yoktur ve demir içeriği çok düşüktür, SR ve AR değerleri yüksektir, bu nedenle serbest CaO miktarını düşürmek için daha yüksek ateşleme (yakma) sıcaklığına ihtiyaç vardır. Çimento M₃ %10 oranında demir cürufu içermektedir ve 3, 7, 28 gün sonunda elde edilen basma dayanımı değerleri sırasıyla 140.3, 193.8, 333.3 kg/cm²'dir. ASTM C150-86'ya göre olması gereken dayanım değerleri ise sırasıyla 120, 190, ve 280 kg/cm²'dir.

4.4 Çelikhane Cürufu İle Harmanlanmış Çimentoların Hidratasyonu ve Özellikleri

Kourounis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çelikhane cürufu içeren harmanlanmış çimentonun özelliklerini incelemiştir. Bu amaçla, bir tane referans numune ve ağırlıkça %45'e kadar çelik cürufu içeren üç tane çimento örneğini incelemiştir. Kalsiyum silikat fazının yüksek oranda bulunmasına bağlı olarak çelik cürufları "0-5mm" olarak kullanılmıştır. Başlangıç ve bitiş priz süreleri, standart yoğunluk (kivam), normal karışımın akışı, otoklav genleşmesi ve basma dayanımı 2, 7, 28 ve 90 günler için ölçülmüştür. Hidratasyon ürünleri XRD ile analiz edilirken, buharlaşamayan su miktarı TGA ile analiz edilmiştir. Sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısı ve morfolojik özellikleri tarama elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Cürufun ve CEM I 42,5'in mineralojik fazları XRD ile belirlenmiştir. Çelik cürufunun mikro yapısı optik mikroskop ile belirlenmiştir. Çimento karışımı çelik cürufu ve çimentonun harmanlanması ile elde edilmiştir.

Çizelge 4.11 Analiz edilen çimentoların bileşimleri ve özellikleri [47]

Kod	CEM I 42,5 (% ağırlıkça)	Çelik Cürufu (% ağırlıkça)	Spesifik Yüzey Alanı (cm ² /g)	Spesifik Gravite (g/cm ³)
C1	100	0	3850	3,16
C2	85	15	3730	3,24
C3	70	30	3620	3,32
C4	55	45	3500	3,41

Çizelge 4.12 Çelik cürufu ve çimentonun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri [47]

Oksitler	Kimyasal Analiz (%)	
	CEM I-42,5	Çelik Cürufu
SiO ₂	21,12	17,53
Al ₂ O ₃	5,55	6,25
Fe ₂ O ₃	1,92	26,36
CaO	63,80	35,70
MgO	2,25	6,45
K ₂ O	1,03	0,26
Na ₂ O	0,25	0,20
SO ₃	3,04	0,75
MnO	-	2,5
TiO ₂	0,15	0,76
ZnO	-	0,85
Serbest CaO	1,15	-
KK	0,85	2,24
Spesifik Yüzey Alanı (cm ² /g)	3850	3070
Spesifik Gravite (g/cm ³)	3,16	3,77

Çimento karışımlarının standart kıvamı ve priz süreleri EN 196-3'e göre belirlenmiştir. Normal karışım akışının belirlenmesinde ASTM C1437 referans alınmıştır. Basma dayanımı ölçümleri EN 196-1 referans alınarak yapılmıştır.

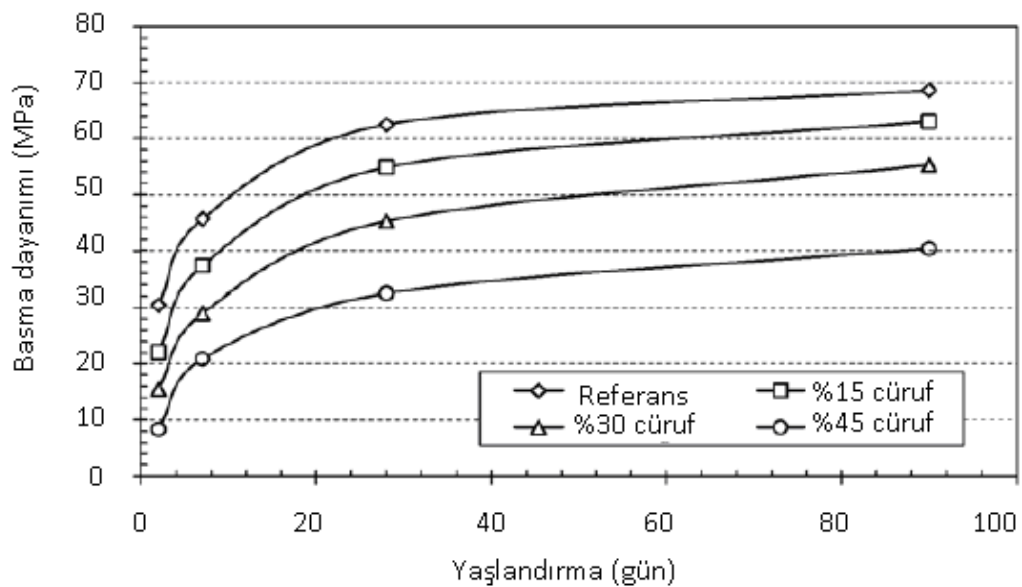
Çelik cürufu ve çimentonun kimyasal özellikleri benzerlik göstermesine rağmen mineralojik yapıları arasında önemli farklılıklar vardır. Çelik cürufundaki en önemli farklılık yüksek demir oksit içeriğidir. Kristalin kalsiyum silikatlar çelik cürufu içerisinde bulunmasına rağmen, trikalsiyum silikat pikinin mevcut olmayışı Portland çimentosunun hidrasyonu ile kıyaslandığında bir farklılık olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çelik cürufundaki mineral fazlardan biri olan FeO, katkısız çimentoda mevcut değildir. Bu faz çimentolaştırıcı özelliklere sahip değildir ve hidrolik fazları oluşturmak için bağlayıcı görev yapmaz. “Su ihtiyacı”, EN 196-3’de standart kıvama sahip çimento karışımını hazırlamak için gerekli olan su miktarı olarak tanımlanmıştır. Çelik cürufu içeren çimentoların su ihtiyacı katkısız çimentodan daha azdır. Akış testleri, cüruf katkısının karışımın işlenebilirliğini artırdığını göstermiştir.

Çizelge 4.13 İncelenen çimentoların fiziksel özellikleri [47]

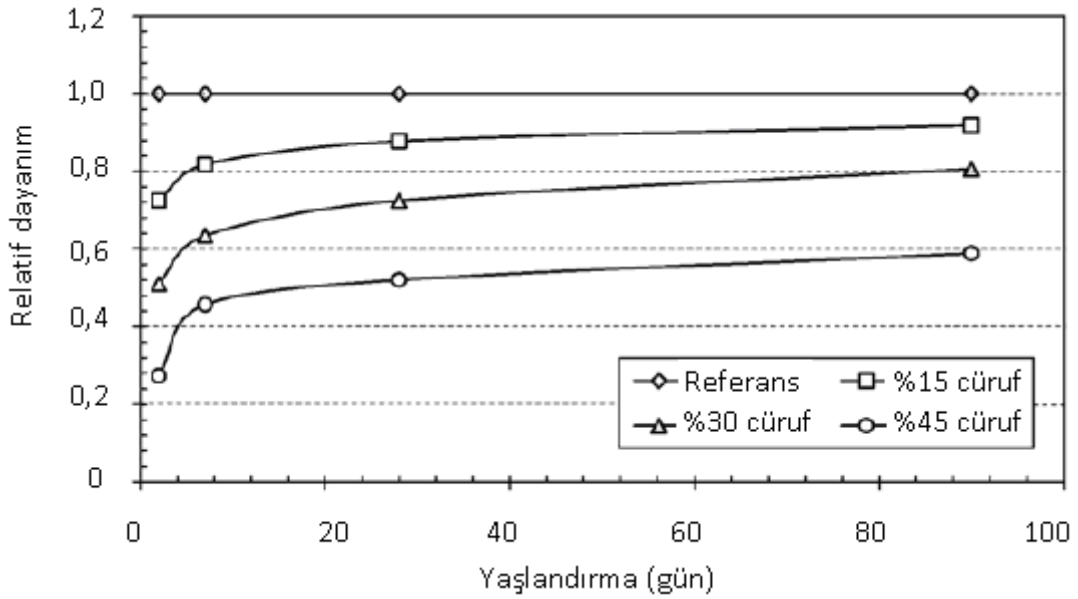
Numune	Çelik Cürufu (% ağırlıkça)	Su ihtiyacı (% ağırlıkça)	Priz Süresi (dakika)		Otoklav Genleşmesi (%)	Normal Karışımın akışı (%)
			Başlangıç	Bitiş		
C1	-	27	155	185	-0,04	103,0
C2	15	26	170	210	-0,02	108,5
C3	30	25	210	240	-0,20	111,5
C4	45	23,5	220	260	0,33	113,5

Harmanlanmış çimentoların katkısız çimentodan daha uzun priz süresine sahip oldukları belirlenmiştir. Sonuç olarak hidrasyon prosesinin yavaşlaması, priz süresinin artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.6 Çimentoların basma dayanımları [47]

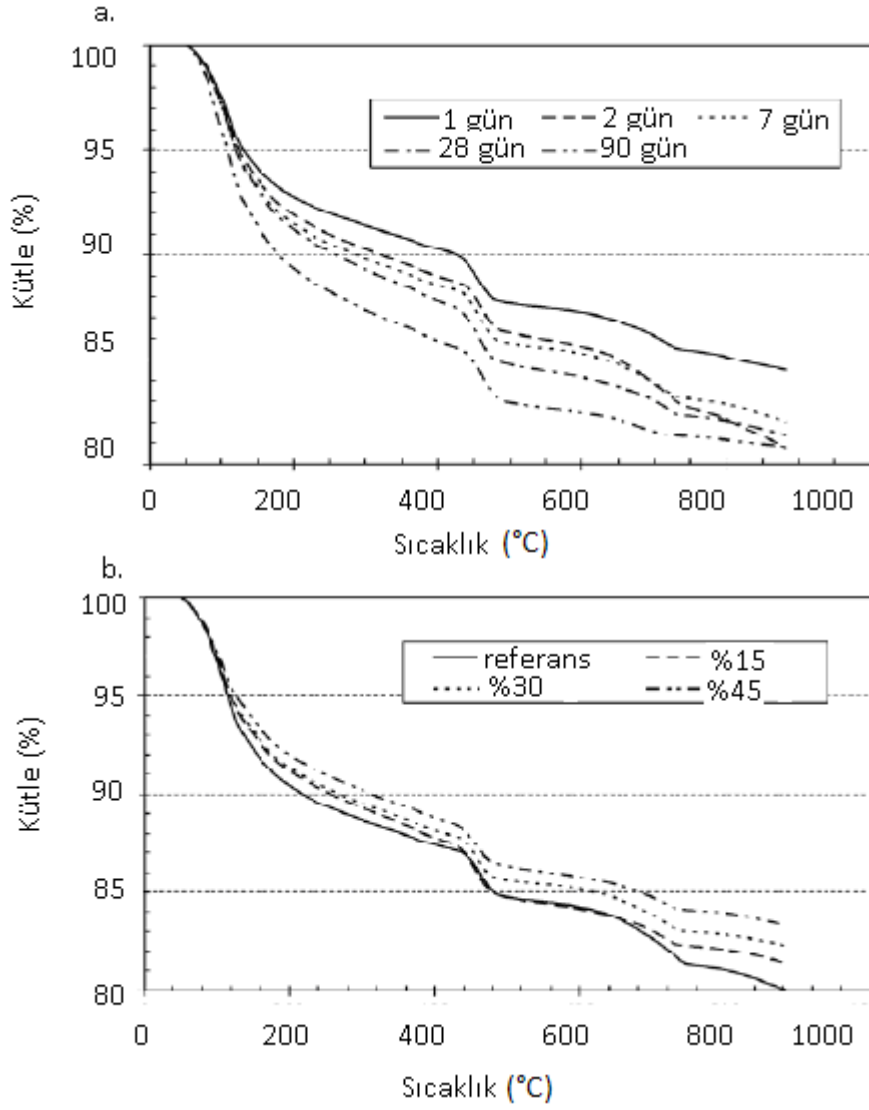
Cüruflu çimentoların basma dayanımları, kullanılan cüruf miktarıyla bağlantılı olarak değişmektedir. Elde edilen sonuçlar, %15 ya da %30 oranında cüruf içeren çimentoların EN 197-1'e göre dayanım sınıfı 42,5 olan grubun gereklerini karşıladığını, cüruf oranı %45 olan çimentonun EN 197-1'e göre dayanım sınıfı 32,5 olan grubun gereklerini karşıladığını göstermektedir.



Şekil 4.7 Yaşlandırma süresine ve kullanılan cüruf miktarına bağlı olarak çimento numunelerinin relatif dayanımları [47]

Relatif dayanım cüruflu çimentonun dayanım miktarının, referans çimentonun dayanım miktarına oranını göstermektedir (aynı yaşlandırma süresinde). Referans numunenin basma dayanımının artma hızı doğrudan hidrasyon hızına bağlı, cüruflu çimentolarda ise hem hidrasyon hızına hem de cüruftaki hidrolik reaksiyonlara bağlıdır. Ayrıca çelik cürufundaki C_3S miktarının daha az olması basma dayanımının düşük olmasına neden olmaktadır.

TGA sonuçları, kütle kaybının 130, 225, 500, 825°C civarında gerçekleştiğini, referans çimento harcının $Ca(OH)_2$ içeriğinin yaşlandırma süresinin artmasına bağlı olarak arttığını, fakat harmanlanmış numunelerde çelik cürufunun hidrasyonu geciktirmesine bağlı olarak yaşlandırma süresinin artmasıyla $Ca(OH)_2$ içeriğinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.8 TG diyagramları; (a) çeşitli sürelerle yaşlandırılmış %15 oranında çelik cürufu içeren çimento, (b) Farklı oranlarda çelik cürufu içeren 28 gün yaşlandırılmış çimento karışımları [47]

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

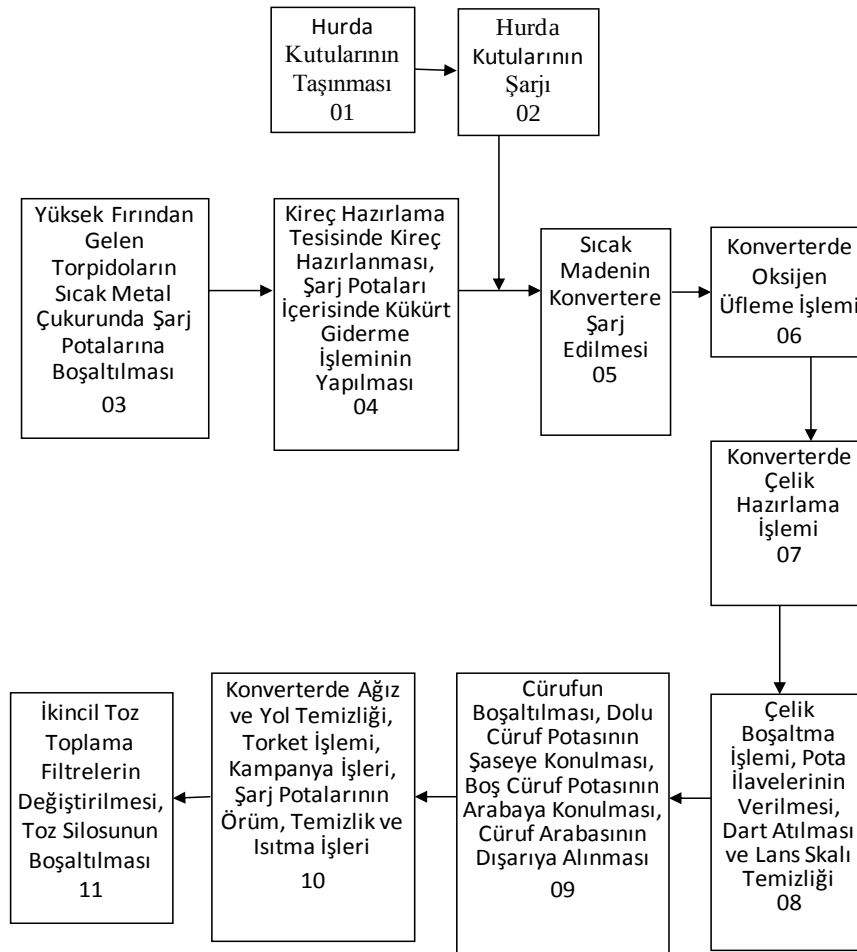
- Cürufli çimentolar katkısız çimento numunesi ile karşılaştırıldığında daha düşük dayanım göstermiştir, cüruf içeriği arttıkça dayanım değerindeki düşüşün arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle, %15 ya da %30 oranında cüruf içeren çimentolar EN 197-1'e göre dayanım sınıfı 42,5 olan grubun gerekliliklerini sağlarken, %45 oranında çelik cürufu içeren çimento numunesi EN 197-1'e göre dayanım sınıfı 32,5 olan grubun gerekliliklerini sağlamaktadır.
- Cürufli çimentoların su ihtiyacının katkısız çimentonun su ihtiyacından daha az olduğu ve cüruf ilavesinin karışımın işlenebilirliğini artırdığı belirlenmiştir. Ancak,

harmanlanmış çimentolar katkısız çimento numunesine göre daha uzun priz süresi göstermiştir.

- Çelik cürufu ilavesi, harmanlanmış çimentoların hidratasyonunu yavaşlatmaktadır. C_2S fazının reaksiyona girme özelliği yavaş olup, faz yapısı ve kristal boyutu hidratasyon hızı üzerinde etkilidir.

ÇELİKHANE CÜRUFUNUN GERİ KAZANIMI

İSDEMİR A.Ş’de; yüksek fırında üretilen sıvı ham demir torpidolar vasıtasıyla çelikhaneye getirilir. Sıvı ham demirin torpidodaki sıcaklığı yaklaşık 1300°C’dir.



Şekil 5.1 Çelikhane proses akış şeması

Çelik üretim prosesinin ilk kademesi kükürt gidermedir. Kükürt soğuk ve sıcak kırılabilirlik yaptığı için çelik bünyesinde istenmez.

Çelikhanede, sıcak metal çukurunda şarj potalarına sıvı ham demir boşaltılır. Kükürt giderme işlemi şarj potalarında yapılır. Kireç hazırlama tesisinde hazırlanan kireç ya da magnezyum, lanslar yardımıyla pota içerisine üflenir. Lanslarda taşıyıcı gaz olarak azot kullanılmaktadır. Sıvı çeliğin bünyesinde bulunan kükürt, kireç ve magnezyumla birleşerek cürufa geçer. Cüruf, cüruf çekme makinası yardımıyla alınır. Bu cürufa “kükürt giderme cürufu” denir.

Kükürt giderme işlemi öncesinde sıvı ham demirdeki kükürt oranı yaklaşık %0,1 iken kükürt giderme işlemi sonrasında %0,01’e düşürülür.

Kükürt giderme işleminden sonra çelik üretimine konverterde (bazik oksijen fırını) devam edilir.

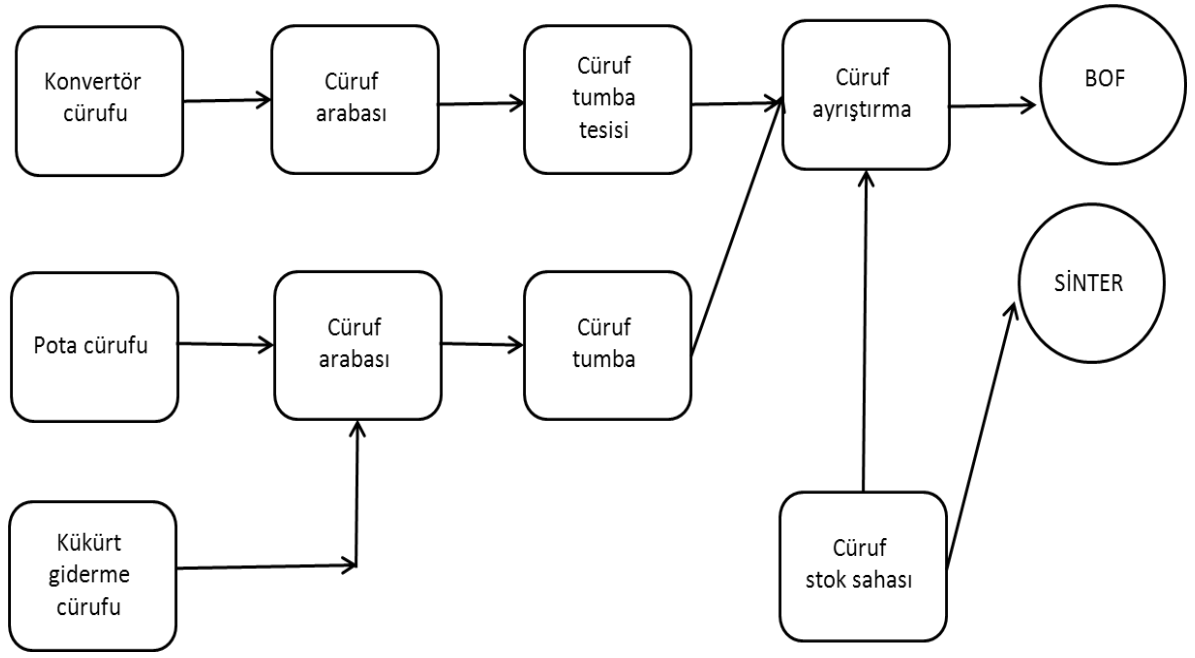
Konverterde ana amaç, oksijen üfleyerek sıvı ham demirin bünyesindeki karbonu oksitlemek ve gerekli karbon seviyesine düşürmektir.

Konverterde (BOF yönteminde), karbon, mangan, fosfor, silis oksijenle reaksiyona girer ve oksitlenerek metal banyosundan uzaklaşırken kükürt de cüruf yapıcılara bağlanır. Meydana gelen bu reaksiyonlar ekzotermik olduğu için sıcaklık yükselir. Sıcaklığı düşürmek ve enerjiden tasarruf etmek amacıyla konvertere hurda şarjı yapılır. Konvertere önce hurda şarj edilir, daha sonra sıvı ham demir boşaltılır. Sonra lanslar yardımıyla oksijen üflenir ve karbon oksitlenerek cürufun yapısına geçer.

Konverterde kullanılan oksijen %99,9 saflıkta, 8-9 bar basınçta ve 760 m³/dk debidedir.

Cüruf yapıcı olarak metalurjik kireç, dolomitik yanmış kireç, florspar ve diğer yardımcı cüruf yapıcılar kullanılır. Kullanılan kireç tipi cürufun kimyasal yapısını etkilemektedir. Örneğin, %40 veya daha fazla dolomitik yanmış kireç kullanılması durumunda cürufun akışkanlığı azalır.

İSDEMİR A.Ş’de cüruf manipülasyonu Şekil 5.2’de belirtildiği şekilde gerçekleştirilmektedir.



Şekil 5.2 Cüruf manipülasyonu

Konverter cürufu, pota cürufu ve kükürt giderme cürufu, cüruf arabaları yardımıyla cüruf tumba tesisine gönderilir. Cüruf potaları, Cüruf Tumba Tesisinde boşaltıldıktan sonra havuzdan skal hurdaları ayrılır ve skal kırma tesislerine gönderilir. Geri kalan cüruf daha sonra elenmek üzere cüruf stok sahalarında stoklanır. Stoklanan cüruf, cüruf stok sahasından kamyonlarla eleme tesisine taşınır. Eleme tesisinde bulunan +55 mm'lik yatay eleğe boşaltılır.



Şekil 5.3 Yatay eleğin yandan görünüşü (+55 mm)

+55 mm'lik elekten geçen cürufun; elek üstü, manyetik vinç ile elenerek ayrılır. Manyetik vincin alamadığı demir dışı kısım kamyonlara yüklenip atık sahasına gönderilir. Manyetik vinç ile ayrılan demirli malzeme “kalın seperatör” olarak adlandırılarak elikhane hurda hazırlama tesisine gönderilir.



Şekil 5.4 Demir dışı cüruf (+55 mm üstü)



Şekil 5.5 Kalın seperatör

Elek altı malzeme (-55 mm) bantlar vasıtasıyla +23 mm ve +11 mm'lik eleklerle taşınır. Burada elenen cürufun elek altı (-11 mm) atık olarak stok sahasına gönderilir.



Şekil 5.6 +23 mm ve +11 mm elek

Elek üstü malzeme (+11 mm) +23 mm'lik ayrı bir elekten daha geçirilir. Manyetik banttı geçirilerek demir dışı cüruf ayrılır ve atık stok sahasına gönderilir. Manyetik bandın tuttuğu demirli malzeme (+11-23 mm) Yüksek Fırınlar Müdürlüğü tarafından kullanılmak üzere stoklanır.



Şekil 5.7 Atık cüruf (-11 mm)

+23 mm'lik elek üzerinde kalan malzeme tekrar manyetik bantt n geçirilir. Manyetik bandın tuttuğu demirli malzeme (>+23 mm) "ince seperatör" olarak adlandırılır. İnce separator hurdası tozsuzlaştırılması amacıyla ikinci kez elendikten sonra stoklanır.



şekil 5.8 +11mm-23 mm arası cüruf



şekil 5.9 İnce separator (+23 mm)

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyisel çalışmalarda İSDEMİR A.Ş'den alınan çelikhane cürufu numunesi kullanılmıştır. Çelikhane cürufunun yapı malzemesi olarak kullanılabilirliğini incelemek amacıyla TS 706 EN 1260 “Beton Agregaları” standardı referans kabul edilmiş ve bu standarda göre deneyler yapılmıştır.

Bu amaçla cüruf numunesine standartta belirtilmiş kimyasal deneylerden TS EN 1744-1 standardının 13. maddesine göre asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi, TS EN 1744-1 standardının 11. maddesine göre toplam kükürt içeriği deneyi, TS EN 1744-1 standardının 7. maddesine göre suda çözünebilir klorür tuzları içeriği deneyi, TS EN 1744-1 standardının 15.1. maddesine göre humus içeriği deneyi ve TS EN 1744-1 standardının 14.2. maddesine göre hafif kirletici miktarı içeriği deneyi yapılmıştır. Ayrıca cüruf numunelerine kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF ve XRD deneyleri yapılmıştır.

Cüruf malzemelerine fiziksel ve mekanik deneyler olarak TS EN 933-1 standardına göre elek analizi (granülometri) deneyi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre cüruf numunelerinin TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre uygunluğu değerlendirilmiş ve deney sonuçlarına göre kategorizasyon yapılmıştır.

Deneyisel çalışmalar Yıldız Teknik Üniversitesi, Tiftik Beton İskenderun Tesisleri ve İSDEMİR A.Ş laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

6.1 Asitte Çözünebilir Sülfat İçeriği

Agregalardaki sülfat iyonları, betona nüfuz ederek burada çimentonun hidrasyonu ile elde edilen kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum alüminat hidratlarla (C-A-H) reaksiyona girerek, sırasıyla alçı ve etrenjit adı verilen ürünler oluştururlar. Bu ürünlerin her ikisi de betonda genleşmelere ve dolayısıyla çatlama ve bozulmalara yol açarlar. Beton agregalarında TS 706 EN 12620 standardına göre, kükürtlü içeriklere asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi ve toplam kükürt içeriği deneyleri yapılmaktadır. Asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi TS EN 1744-1 standardına göre yapılır. Deney sonucuna, TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre karar verilir.

Deneyde; hassas terazi, kül fırını, etüv, 0,125 mm göz açıklığına sahip elek, kroze, havan, cam malzemeler, kül içermeyen filtre kağıdı, hidroklorik asit çözeltisi, baryum klorür çözeltisi ve distile su kullanılmıştır.

Deney numunesi, 0,125 mm göz açıklığı olan deney eleğinden geçirilerek yaklaşık 20 g’lık bir kütle elde edilmiştir. Deney numunesi olan bu kütleden yaklaşık 2 g alınmıştır. Numunenin nemini almak ve sülfatların oksitlenmemesi için $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ ’yi geçmeyecek şekilde kurutma yapılmıştır.

Deney numunesi parçası (m_1), 0,1 mg yaklaşımla tartılarak 250 ml’lik bir behere alınmıştır ve 90 ml soğuk su ilave edilmiştir. Numune karıştırılırken, 10 ml derişik hidroklorik asit ilave edilmiştir. Çözelti hafif ısıtılmış ve bir cam karıştırma çubuğu ile karıştırılmıştır. Çözelti, 15 dakika boyunca kaynama noktasının hemen altında tutulmuştur. Çözelti, 400 ml’lik bir behere orta dereceli süzgeç kağıdından (beyaz bantlı) süzülüp sıcak su ile yıkanmıştır.

Hacim yaklaşık 250 ml’ye ayarlanıp, 5 dakika kaynatılmıştır. Çözeltinin berraklığı kontrol edilmiştir. Kaynama noktasına gelen çözelti kuvvetlice karıştırılırken, damla damla kaynama noktasının hemen altına ısıtılmış 10 ml baryum klorür çözeltisi ilave edilmiştir. Baryum klorür ilavesini takiben beyaz renkte baryum sülfat çökeleği oluştuğu gözlenmiştir. Kaynama noktasının biraz altında 30 dakika daha tutulduktan sonra ılık bir yerde bir gece bırakılmıştır. Çökelek iyi dereceli süzgeç kağıdı (mavi bantlı) olan bir cam huniye aktarılıp süzölmüştür. Her iki durumda da çökelek birkaç kere sıcak suyla klorür iyonu kalmayınca kadar yıkanmıştır.

Boş kroze tartılmıştır (m_2). Filtre kağıdı elektrikli fırında $(110\pm5)^\circ\text{C}$ 'de yaklaşık 30 dakika kurutulup, $(925\pm25)^\circ\text{C}$ sıcaklığa kademeli yükseltilerek, kütle kaybı olmayıncaya kadar 15 dakika tutulmuştur. Kroze desikatöre alınmıştır ve 0,1 mg yaklaşımla tartılmıştır (m_3). Krozenin kütleindeki artıştan çökeleğin kütlesi m_4 belirlenmiştir. Deney sonucu (6.1) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Asitte çözünebilir sülfat içeriği } (\%SO_3) = (m_4/m_1) \times 34,3 \quad (6.1)$$

m_1 : deney numunesi parçasının kütlesi (g)

m_4 : çökeleğin kütlesi (g) ($m_4 = m_3 - m_2$; m_3 =kroze+çökelek (g), m_2 : kroze (g))

Yapılan deneylerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Deney numunesi m_1 : 2,0084 g

Boş kroze ağırlığı m_2 : 14,8765 g

Kroze ve çökeleğin toplam ağırlığı m_3 : 14,9112 g

Çökeleğin ağırlığı $m_4 = 14,9112 - 14,8765 = 0,0347$

Asitte çözünebilir sülfat içeriği $(\%SO_3) = (0,0347/2,0084) \times 34,3 = \%0,593$

Cüruf numunesinin asitte çözünebilen sülfat içeriği yüzdesi kütlece %0,8'den küçük olduğu için, TS 706 EN 12620 standardına göre $AS_{0,8}$ kategorisine girmektedir ve agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.2 Toplam Kükürt İçeriği

Toplam kükürt içeriği deneyi TS EN 1744-1 standardına göre yapılır. TS 706 EN 12620 "Beton Agregaları" standardında, cüruf agregaları için toplam kükürt içeriği değerinin S cinsinden %1 sınır değerini aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Bir agrega deney numunesi parçası, mevcut kükürt bileşimini sülfatlara dönüştürmek için brom ve nitrik asit ile muamele edilir. Sülfatlar, $BaSO_4$ olarak çöktürülür ve tartılır. Kükürt muhtevası agreganın kütlece yüzdesi olarak ifade edilir.

Deneyde; hassas terazi, kül fırını, etüv, 0,125 mm göz açıklığına sahip elek, kroze, havan, cam malzemeler, kül içermeyen filtre kağıdı, hidroklorik asit çözeltisi, baryum klorür, brom nitrik asit çözeltisi ve distile su kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Deneyde kullanılan kül fırını

Deney numunesi, 0,125 mm göz açıklığı olan deney eleğinden geçirilerek yaklaşık 20 g'lık bir kütle tartılmıştır. Deney numunesi olan bu kütleden yaklaşık 1 g alınmıştır. Numunenin nemini almak ve sülfidlerin oksitlenmemesi için $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 'yi geçmeyecek şekilde kurutma yapılmıştır.

Deney numunesi parçası (m_1) 0,1 mg yaklaşımla tartılıp, huniyle geniş ağızlı bir erlene aktarılmıştır. Çeker ocakta erlene 3 ml su ve 1 ml brom ilave edilmiştir. Karışım, istenmeyen topaklaşma oluşumunu engellemek için hafifçe 1 dakika çalkalanmıştır. Sonra, huniyle yavaşça 15 ml kükürtsüz, derişik nitrik asit ilave edilmiştir. Karışım 1 saat tutulmuştur ve aralıklı olarak bir cam çubuk ile karıştırılmıştır. 30 ml su ilave edilmiştir ve karışım bir ısıtıcı üzerinde, yoğun kahverengi dumanlar kesilene kadar hafifçe kaynatılmıştır. 5 ml derişik hidroklorik asit ve 10 ml su ilave edilmiştir. Karışım kaynatılarak küçük bir hacme azaltılmıştır. İlave etme ve karışımı küçük hacme kaynatarak azaltma işlemi tekrar edilmiştir. Erleneki karışım, 250 ml'lik bir behere aktarılıp, beherdeki toplam hacim yaklaşık 100 ml olana kadar erlen yıkanmıştır.

Az bir miktar süzgeç kağıdı hamuru ilave edilerek beherin içindekiler hemen hemen kaynama durumuna getirilmiş, çözeltiye amonyak ilave edilerek alkali olması sağlanmış, alkalilik bir pH metre yardımıyla kontrol edilmiştir. Kaynama noktasının biraz altında 30 saniye kaynatılmıştır. Orta gözenekli bir süzgeç kağıdı (beyaz bantlı) kullanılarak süzölmüştür. Biraz sıcak distile su ile yıkanıp, süzöntüler muhafaza

edilmiştir. Süzgeç kağıdı behere alınıp 70 ml sıcak su ilave edilmiş 5 ml derişik hidroklorik asit ile tekrar çözülmüştür. Kaynatma, çöktürme, süzme ve yıkama işlemleri yukarıdaki gibi yapılmıştır. Çökelti ayrılmıştır. Birleştirilmiş süzüntüler asitlendirilip 1 ml derişik hidroklorik asit ile yıkanmıştır (hepsi yaklaşık 220 ml olmalıdır). Kaynama noktasına getirilip, 5 dakika kaynatılmıştır. Eş zamanlı olarak kaynama noktasındaki çözelti kuvvetlice sallanıp, damla damla 10 ml baryum klorür çözeltisi eklenip kaynama noktasının biraz altına kadar ısıtılmıştır.

Boş kroze tartılmıştır (m_2). Filtre kağıdı elektrikli fırında $(110\pm5)^\circ\text{C}$ 'de yaklaşık 30 dakika kurutulup, $(925\pm25)^\circ\text{C}$ sıcaklığa kademeli yükseltilerek, kütle kaybı olmayıncaya kadar 15 dakika tutulmuştur. Kroze desikatöre alınmıştır ve 0,1 mg yaklaşımla tartılmıştır (m_3). Krozenin kütlesindeki artıştan çökeleğin kütlesi m_4 belirlenmiştir. Deney sonucu (6.2) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam kükürt içeriği (\%S)} = (m_4/m_1) \times 13,74 \quad (6.2)$$

m_1 : deney numunesi parçasının kütlesi (g)

m_4 : çökeleğin kütlesi (g) ($m_4 = m_3 - m_2$; m_3 =kroze+çökelek (g), m_2 : kroze (g))

Yapılan deneylerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Deney numunesi m_1 : 1,0176 g

Boş kroze ağırlığı m_2 : 14,8765 g

Kroze ve çökeleğin toplam ağırlığı m_3 : 14,9112 g

Çökeleğin ağırlığı $m_4 = 14,9112 - 14,8765 = 0,0347$

$$\text{Toplam kükürt içeriği (\%S)} = (0,0347/1,0176) \times 13,74 = \%0,508$$

Cüruf numunesinin toplam kükürt içeriği yüzdesi kütlece %1'den küçük olduğu için, TS 706 EN 12620 standardına göre agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.3 Suda Çözünebilir Klorür İçeriği

Çelik donatılı beton yapılarda, betonun klor içeriğinin yüksek olması korozyona sebebiyet vermektedir. Betonun toplam klor içeriği agrega, beton karma suyu,

kimyasal katkı ve çimentodan gelen klorür içeriklerine göre hesaplanır. Elde edilen toplam klor sınıfına göre üretilen betonun çelik içeren yapılarda kullanılıp kullanılmayacağı anlaşılır. Bu nedenle agreganın da klor içeriği önem taşımaktadır.

TS 706 EN 12620'a göre birleştirilmiş agreganın suda çözünebilen klorür iyon muhtevasının %0,01'den daha fazla olmadığı biliniyorsa (mesela, ülke içindeki ocaklardan çıkarılan agregalar için), bu değer, betonun klorür muhtevasının hesabında kullanılabilir. İçeriğin bilinmediği durumlarda deney, TS EN 1744-1 standardı 7. maddesinde belirtilen metoda göre yapılmalıdır.

Deneyde; etüv, terazi, mekanik çalkalayıcı, büret, nitrik asit çözeltisi, amonyum demir III sülfat indikatör çözeltisi, amonyum tiyosiyanat çözeltisi, gümüş nitrat çözeltisi ve cam malzemeler kullanılmıştır.

Deney numunesi $110\pm5^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kurutularak sabit tartıma getirilmiştir. Yaklaşık (500 ± 75) g olan ince agregalı deney numunesi parçası elde edilmiştir. 2 litre kapasiteli, geniş ağızlı, cam iki şişe kullanılmıştır. Her bir şişe tartılıp, kütleleri 1 g yaklaşımla kaydedilmiştir. Elde edilen deney numunesi parçaları şişelere konulmuştur. Şişeler ve içindekiler tartılıp, kütleleri 1 g yaklaşımla kaydedilmiştir. Her bir şişedeki agrega kütlesi, farktan hesaplanmıştır. Her bir şişeye 1 litre su ilave edilmiştir.

Şişeler, 60 dakika boyunca bir çalkalayıcıda karıştırılmıştır. Sonra, ekstraktlar kuru, orta gözenekli süzgeç kağıdından (beyaz bantlı) temiz kuru bir behere 100 ml berrak bir süzüntü toplanıncaya kadar süzölmüştür. 100 ml süzölmüş ekstrakt, 100 ml'lik bir pipetle alınıp 250 ml'lik bir erlene aktarılmıştır. Erlene 5 ml nitrik asit ilavesini takiben bir büret ile bütün klorürler çökene kadar gümüş nitrat çözeltisi ilave edilmiştir. Harcanan gümüş nitrat çözeltisi hacmi V_5 kaydedilmiştir.

2 ml 3, 5, 5-trimetilhekzan-1-ol ilave edilmiştir. Tıpa takılıp, çökelti oluşması için erlen çalkalanmıştır. Tıpa çözeltiyi kaybetmekten sakınarak, dikkatlice çıkarılıp, su ile çalkalanıp, yıkama suyu çözeltide toplanmıştır.

5 ml amonyum demir III sülfat indikatör çözeltisi ilavesini takiben ayarlı tiyosiyanat çözeltisi bir büretle ilk kalıcı renk değişimi, yani yarı berrak beyaz renk mat kahverengiye dönüşüncüye kadar ilave edilmiştir. Çözelti, ayarlama için kullanıldığı zamanki gibi aynı renkte olmuştur. İlave edilen tiyosiyanat çözeltisinin hacmi V_6 ,

kaydedilmiştir. İkinci deney numunesi ekstraktı için de aynı işlemler tekrarlanmıştır. Her ekstraktın tayinlerinin sayısı bir olarak sabittir.

Deney sonuçları, iki ekstraktın tayinlerinin sonucunun ortalaması olarak; %0,001 yaklaşımla verilmiştir. Deney sonucu (6.3) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C=0,003546 \times W \times [V_5 - (10 \times C_T \times V_6)] \quad (6.3)$$

Burada;

V_5 : gümüş nitrat çözeltisinin hacmi (ml)

V_6 : ilave edilen ayarlı tiyosiyanat çözeltisinin hacmi (ml)

C_T : ayarlı tiyosiyanat çözeltisinin derişimi (mol/l)

W : su/agrega oranı (gram/gram), hafif agregalar için W 1000 g/agreganın kütlesi, g'dır

Yapılan deneylerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

V_5 : 4,98 ml

V_6 : 4,63 ml

C_T : 0,1 mol/l

$W=1000/500=2$

Suda çözünebilir klorür içeriğı (%) = $0,003546 \times 2 \times [4,98 - (10 \times 0,1 \times 4,63)] = 0,0025$

TS 706 EN 1260 standardına göre cüruf numunesinin suda çözünebilir klorür içeriğı %0,01 sınır değerin altında olduğu için agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

6.4 Humus İçeriğı

Humus, hayvansal ve bitkisel atıkların toprakta çürümesiyle oluşmuş organik bir maddedir. Humus içeriğı, bir deney numunesi parçası sodyum hidroksit çözeltisinde çalkalandığında oluşan renkten tayin edilir [51].

Cüruf numunesinin humus içeriğini tayin etmek amacıyla TS EN 1744-1 standardı madde 15.1 referans alınarak deneyler yapılmıştır. Humus, sodyum hidroksit ile reaksiyona girdiğı zaman koyu bir renk oluşur ve yöntem bu temele dayanır. Rengin

yoğunluğu humus içeriğine göre değişir. Eğer çözelti açık renkli ise, bu agreganın önemli miktarda humus içermediğini göstermektedir. Eğer oluşan renk koyu ise, diğer faktörlere de bağlı olarak humus içeriğinin yüksek olduğunu ifade etmektedir, ancak kesin bir sonuç vermez.

Deneyde; %3'lük sodyum hidroksit çözeltisi, cam malzemeler, etüv ve elek (4 mm) kullanılmıştır.

Deney numunesi etüvde $40\pm5^{\circ}\text{C}$ 'de kurutulmuştur. Numune 4 mm göz açıklı elekten elenmiştir. Elek üstünde kalan kısım alınarak, eleğin altına geçecek şekilde kırılmıştır ve elek altına geçen önceki malzemeyle birleştirilmiştir.

Bir cam şişeye, 80 mm yüksekliğe kadar %3'lük NaOH çözeltisi konulmuştur. Takiben çözelti ve agrega yüksekliği 120 mm oluncaya kadar deney numunesi parçası eklenmiştir. Hava kabarcıklarının çıkması için şişe çalkalanmıştır. Şişenin tıpası kapatılıp, 1 dakika kuvvetlice çalkalanmıştır ve beklemeye bırakılmıştır. 24 saat sonra, benzer şişede bulunan standart renk çözeltisi ile çözeltinin rengi mukayese edilmiştir. Standart renk çözeltisi koyu kahve renkli bir çözeltidir; 45 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5,50 g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 'nun, 1 ml derişik HCl ile 279,5 g H_2O içerisinde çözülmesi ile elde edilmektedir (deney sonucu, çözeltinin renginin standart renkten açık (negatif) veya koyu (pozitif) olması şeklinde belirtilir).

Yapılan deney sonucunda, oluşan rengin standart çözelti renginden açık olduğu görülmüştür. TS 706 EN 12620 standardına göre agrega humus içermemeli ve TS EN 1744-1 deney standardına göre yapılan humus içeriği deneyinin sonucunda oluşan rengin standart renkten açık olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle, cürufun agrega olarak kullanımının uygun olduğu söylenebilir.

6.5 Hafif Kirletici Miktarı Tayini

Bu deney, agrega içerisindeki hafif kirletici maddelerin kütlece yüzdesini belirlemek amacıyla uygulanır. Bu yöntem linyit, kömür gibi, harç ve beton yüzeyinde lekelenmelere neden olabilecek maddelerin miktarını tayin etmek için kullanılır. Deney, TS EN 1744-1 standardı madde 14.2'ye göre yapılır.

Deneyde; 0,300 mm kepçe elek, 2 gr/cm³ yoğunluğa sahip doygun çinko klorür çözeltisi, kaplar ve etüv kullanılmıştır.

Laboratuvar numunesi olarak 5 kg agrega, deney numunesi olarak ise içerisinde (350±50) g alınmıştır. Deney numunesi bir tepsi üzerine yayılıp 110±5°C'deki etüve konulmuştur. Etüvde kurutulduktan sonra (m₁) kütlesi 0,1 g yaklaşımla kaydedilmiştir. Agrega 300 µm göz açıklıklı eleklerle daha ince olan kısımdan ayrılmıştır.

Yaklaşık 1 litre çinko klorür çözeltisi veya sodyum politungstat 2 litrelik behere boşaltılmıştır. Çözeltinin içine agrega ilave edilip, bir cam çubukla hafifçe karıştırılmıştır. Yüzen tanecikler cam çubukla hafif karıştırılarak taneciklerden hava kabarcıklarının ayrılması sağlanmıştır.

Çözeltinin berraklaşan kısmı, ikinci bir 2 litrelik behere 250 µm göz açıklıklı elekten geçebilecek şekilde dekante edilmiştir. Bunu yaparken, yüzen taneciklerin geçmesine ve elekte toplanmasına müsaade edilmiştir. Eleğe hiç agrega geçmemesi sağlanmıştır. İlk beherdeki çözeltiye dönülüp agrega yığını tekrar karıştırılmıştır. Çözeltide yüzen tanecikler, tekrar elekten dekante edilerek geçirilmiştir ve bu işlem, bütün yüzen tanecikler elekte toplanana kadar tekrarlanmıştır.

Elek ve üzerindeki tanecikler, çinko klorür veya sodyum politungstat uzaklaştırılınca kadar su ile yıkanmıştır. Elek ve içindekiler (40±5)°C'de (20±4) saat kurutulmuştur. Sonra içindekiler hafif hafif vurularak bir buharlaştırma kapsülüne aktarılmıştır ve kurutma (110±5)°C'de (4±0,25) saatte tamamlanmıştır. Kapsül soğutulup, hafif tanecikler (m₂), 0,1 g yaklaşımla tartılmıştır.

Agregadaki hafif taneciklerin yüzdesi, m_{LPC} kütlece yüzde olarak (6.4) denkliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$m_{LPC}=(m_2/m_1)\times 100 \quad (6.4)$$

Burada;

m₁: etüvde kurutulmuş deney numunesi parçasının kütlesi (g)

m₂: deney numunesi parçasından ayrılarak, etüvde kurutulmuş hafif partiküllerin kütlesi (g)

Yapılan deneylerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

m_1 : 360,5 g

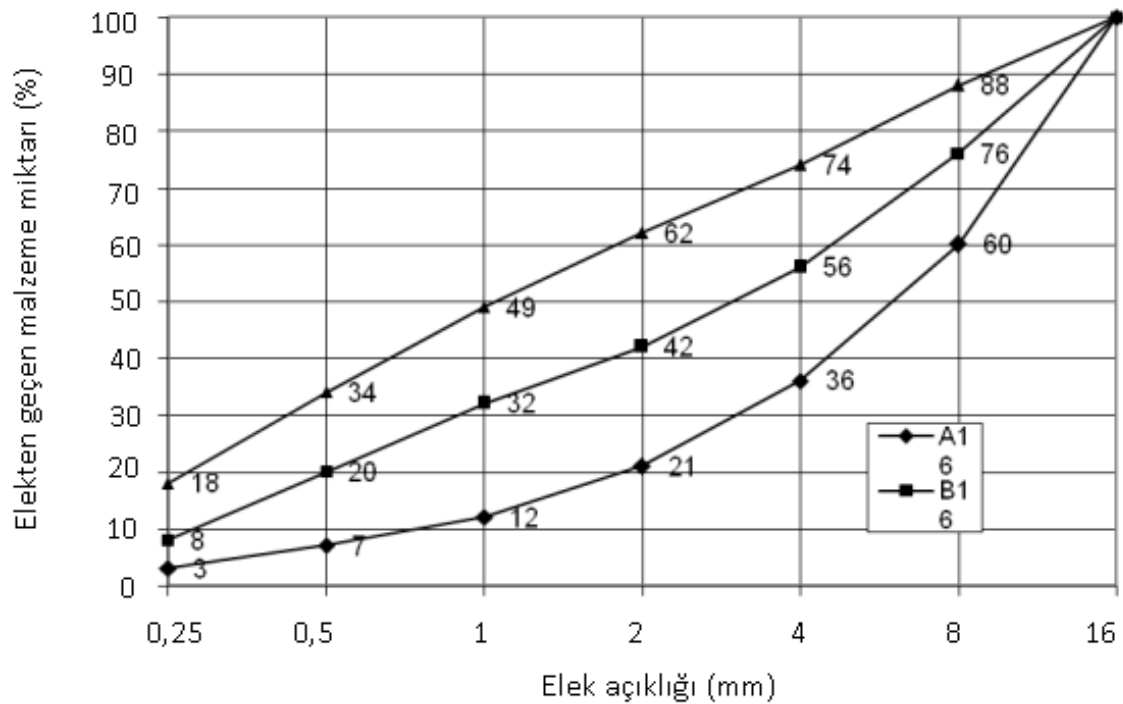
m_2 : 0,009 g

$m_{LPC}=(0,009/360,5)\times100=\%0,0025$

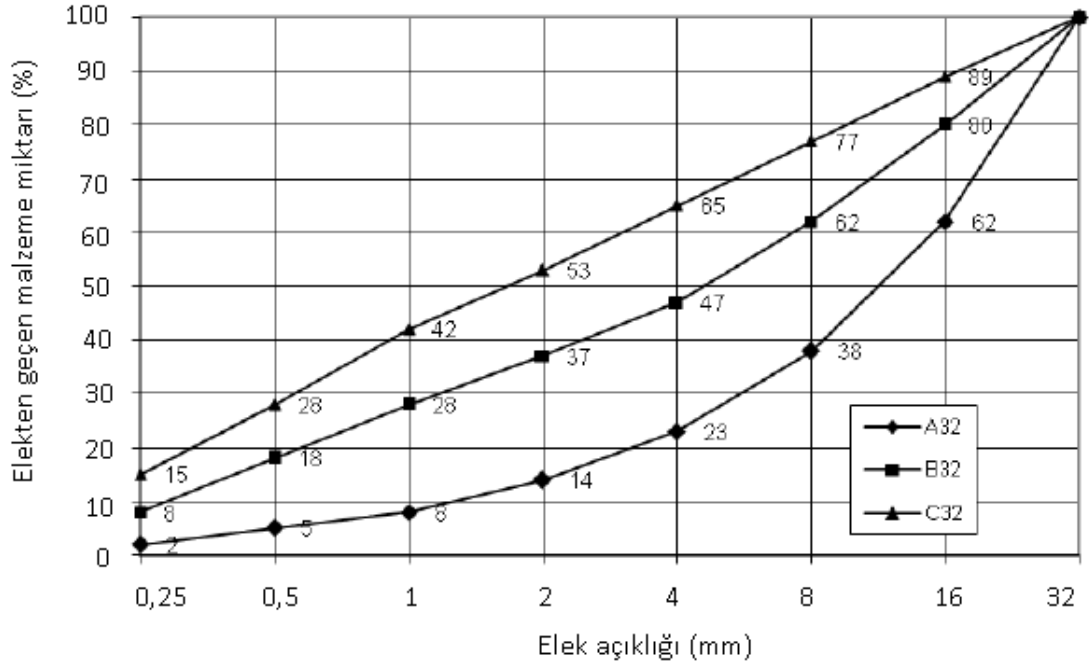
TS 706 EN 12620 standardına göre hafif kirletici miktarı normal olarak ince agregalarda %0,5'i, iri agregalarda %0,1'i geçmemelidir. Ancak betonun yüzeyinin önemli olduğu durumlarda ince agreganın %0,25'ini ve iri agreganın %0,05'ini geçmemesi gerekmektedir. Cüruf malzemesinin hafif kirletici miktarı sınır değerlerin altında bulunmuştur.

6.6 Tane Büyüklüğü Dağılımı (Granülometri, Elek Analizi)

Agrega karışımı içerisinde belirli boyuttaki tanelerin dağılımını gösteren eğriye "granülometri eğrisi" denir. Agreganın granülometri eğrisi TS 3530 EN 933-1 standardında belirtildiği şekilde yapılır [52].



Şekil 6.2 Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=16$ mm [5]



Şekil 6.3 Referans granülometri eğrileri, $D_{max}=31,5$ mm [5]

Deney, malzemenin bir seri eleme işlemi yardımıyla azalan büyüklüğe sahip farklı tane boyutları halinde bölünmesi ve ayrılmasından oluşur.

Beton üretiminde kullanılacak karışım agregasının granülometrisi ya "ideal granülometri eğrileri" ile uyuşmalıdır ya da "ideal bölgeler" dediğimiz bölgeler içinde kalmalıdır.

A-B eğrileri arasındaki bölge beton üretiminde kullanılacak karışım agregası için "en iyi", B-C arası ise "kullanılabilir" bölgeler olmaktadır. Öte yandan, granülometrisi A ve C eğrileri dışında kalan agrega, beton üretiminde kullanılmamalıdır.

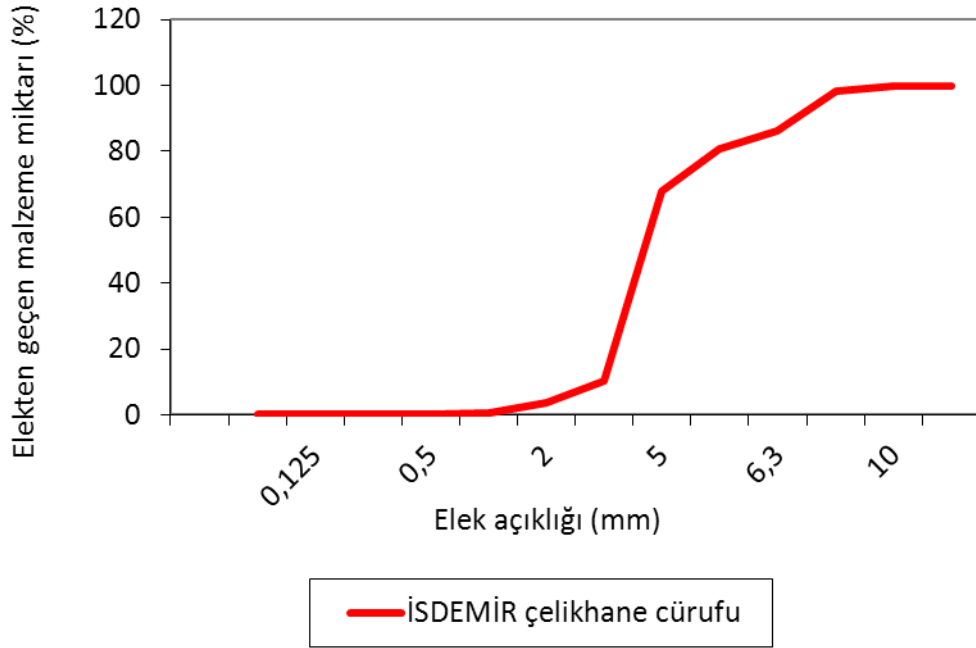
Beton karışım agregasının ideal bölge içinde kalması, kompasesinin yüksek olmasını ifade etmektedir. Dolayısıyla kompasesi yükselen betonun dayanımı da büyük değer olacaktır. Diğer taraftan kompasesi yüksek agreganın kullanılmasıyla tanelerin arasını doldurmak için daha az çimento gerekecek, böylece daha ekonomik beton üretilmiş olacaktır. Ayrıca, granülometri kullanılan su miktarını da etkilemektedir. İdeal bölgede olan agregaların işlenebilirlik açısından iyi özellik göstermesi beklenir.

Bir agreganın granülometri eğrisi aşağıdaki özellikleri gösterir [22].

- Granülometri eğrisi artan bir eğridir, sınır durumunda ancak yatay doğru parçaları olabilir.
- Eğrinin %100 çizgisine yakın olması, karışımın ince olduğunu, %0 çizgisine yakın olması agreganın iri olduğunu gösterir.
- Eğri tüm elek bölgesinde mevcuttur, eğrinin %100 veya %0 çizgileriyle çakışması, o bölgelerde bulunmadığı anlamına gelmez.
- Birbirini izleyen iki elek numarasına karşı gelen % ordinatlarının farkı, agrega yığnında o iki elek arasında kalan malzeme yüzdesini verir.
- Eğer egridde yatay bir çizgi varsa, bu yatay çizgiye karşı gelen elekler arasında tane yok demektir. Bu tür bir granülometriye sahip olan agregalara "kesikli (sürekli)" granülometrilik agregalar denir.

Çizelge 6.1 İskenderun Demir Çelik Fabrikası çelikhane cürufu elek analizi sonucu

Elek (mm)	Elek Üzerinde Kalan Ağırlık (g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (%)	Elek Altında Kalan Toplam Ağırlık (%)
(1)	(2)	(3)=Σ(2)	(4)=(3)/M ₁	(5)=100-(4)
11,2	-	-	-	-
10	3,5	3,5	0,35	99,65
8	14,6	18,1	1,81	98,19
6,3	122,1	140,2	14,02	85,98
5,6	54,2	194,4	19,44	80,56
5	128,1	322,5	32,25	67,75
4	574,5	897,0	89,70	10,30
2	66,2	963,2	96,32	3,68
1	29,9	993,1	99,3	0,50
0,5	4,2	997,3	99,7	0,30
0,25	-	-	-	-



Şekil 6.4 İSDEMİR çelikhane cürufu granülasyon eğrisi

Deneyisel çalışmada kullanılan cüruf numunesi, maksimum 16,5 mm'ye göre hazırlanmış olan referans granülometri eğrisi değerlerini sağlamaktadır.

6.7 XRF ve XRD Deneyleri

Cüruf numunesinin kimyasal içeriğini belirlemek amacıyla XRF cihazı kullanılarak analiz yapılmıştır.

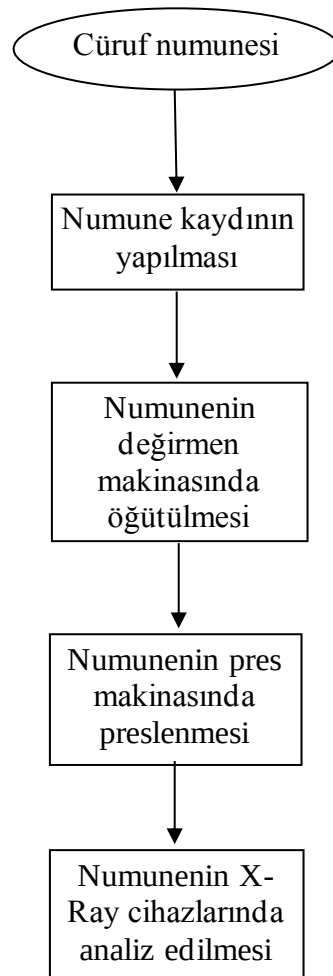
XRF analizi ile toz malzemelerin kimyasal bileşimi ağırlıkça yüzde olarak hesaplanabilmektedir.

XRF deneyinde, ARL 9800 XP-161 X-Ray Spektrometresi kullanılmıştır. ARL 9800 XP-161 X-Ray Spektrometresi, 24 element sabit kanallı genel oksit programı olan bir cihazdır. Bilgisayar ortamında "software" altında çalışmaktadır. Na, Mg, F kanalları FPC (akış orantılı sayıcı) dedektörlü, K, Al, Ca, Fe, Mn, Sn, Cu, Pb, Zr, Si, Mo, S, Ni, Ti, W, Zn, As, Cr, Ba kanalları SC (sintilasyon sayıcı) dedektörlüdür.



Şekil 6.5 ARL 9800 XP-161 X-Ray spektrometresi

Cüruf numunesi doğrudan analiz edilememiş olup, XRF için bazı işlem adımlarından geçirilmiştir (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Kimyasal analiz işlem adımları

Şekil 6.6'da da ifade edildiği şekilde, cüruf numunesi öncelikle değirmen makinasında öğütülerek toz hale getirilmiştir. Sonra, pres makinasında preslenerek analiz edilmiştir.



Şekil 6.7 Preslenerek tablet haline getirilmiş çelikhane cüruf numunesi

Çizelge 6.2 Çelikhane cürufu XRF analizi sonuçları (ağırlıkça %)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O
12,52	52,52	2,80	8,10	11,28	4,66	2,35	0,05
TiO ₂	MgO	S	Fe	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Baziklik	Toplam
0,22	8,10	0,60	12,88	0,50	0,46	4,05	96,86

Çelikhane cüruf numunesinin içerisinde bileşikler halinde, bağlı yapıda bulunan kimyasal bileşenleri belirlemek için XRD analizi yapılmıştır.

XRD, X-ışınları tarafından oluşturulan kırınım deseninden atomik düzeyde bilgi edinmek için kullanılmaktadır. Temeli, analiz sonucunda oluşan piklerin, bilgisayar programında tanımlanmış kimyasal bileşenler ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır. X-ışını ultraviyole ışıktan daha kuvvetli fakat gamma ışınından daha zayıf enerjili ışıdır. X-ışınları ölçümleri kristale zarar vermeksizin yapısı hakkında bilgi veren güçlü bir yöntemdir. X-ışınları kırınımı günümüzde malzeme karakterizasyonu için endüstriyel ve bilimsel araştırmalarda; fizik, kimya, biyoloji, biyokimya, malzeme ve metalurji, jeoloji, madencilik, çimento, seramik ve teknolojik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. XRD uygulamaları;

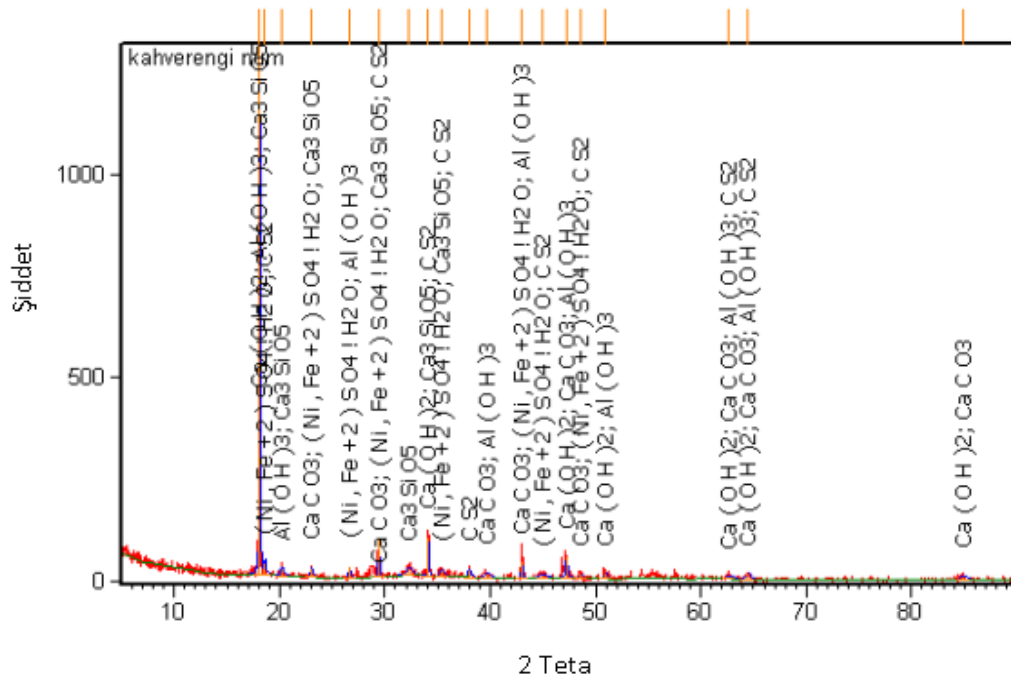
- Malzemenin içerdiği fazları belirlemekte, nicel faz analizinde
- Sıcaklık, basınç v.s. fiziksel parametrelere bağlı faz değişimlerinde
- Tanecik boyutu belirlemede

XRD analizi, Philips marka Panalytical X-Pert Pro model XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Cu X-ışını tüpü ($\lambda=1.53 \text{ cm}^{-1}$) ile 45kV ve 40mA güç kullanılarak 2θ açısı $0-90^\circ$ arasında yapılmıştır.



Şekil 6.8 Philips Panalytical X-Pert Pro XRD cihazı

Çelikhane cürufu numunesi XRD ile farklı açılarda analiz edilmiş olup sonuçları Şekil 6.9’da gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Çelikhane cürufu numunesinin XRD analiz sonucu

XRF analizi sonucuna göre elikhane cürufu numunesi yüksek oranda demir, kalsiyum ve silisyum içermektedir. Ayrıca düşük oranda, mangan, titanyum ve potasyum muhteva etmektedir. Bazikliği 4,05'dir.

XRD analizi sonucunda elikhane cürufunun yapısında demirin sülfatlar halinde bulunduğu ve alüminyum oksit fazının da var olduğu görülmüştür. Bu durum dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir. Kalsiyum karbonat fazının bulunması, elikhane cürufunun beton üretiminde kullanılması halinde genleşme miktarının fazla olacağını ifade etmektedir. Ancak beton üretiminde hangi oranda elikhane cürufunun kullanılmasının genleşmeyi ve beton yapısını olumsuz etkileyeceğini belirlemek için deneme beton üretimleri yapılmalıdır.

BÖLÜM 7

BETON ÜRETİMİ

Beton üretiminde İskenderun Demir ve Çelik A.Ş'den temin edilen çelikhane cürufu kullanılmıştır. Üretim, İskenderun Tiftik Beton tesislerinde gerçekleştirilmiştir.

Beton üretiminde, çimento, uçucu kül, su, ince agrega (0-4 mm), kaba agrega (5-12 mm, 12-22 mm) ve çelikhane cürufu kullanılmıştır.

7.1 Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda verilmiştir.

7.1.1 Çimento

Beton üretiminde CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmış olup fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de verilmektedir.

Çizelge 7.1 Beton üretiminde kullanılan çimentonun kimyasal analiz sonuçları

Özellik (%)	Standart Değeri (TS EN 196-1)	Analiz Sonucu
SO ₃	≤4	2,85
Cl ⁻	≤0,1	0,01
Çözünmeyen Kalıntı	≤5	0,64
KK	≤5	1,78

Çizelge 7.2 Beton üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel analiz sonuçları

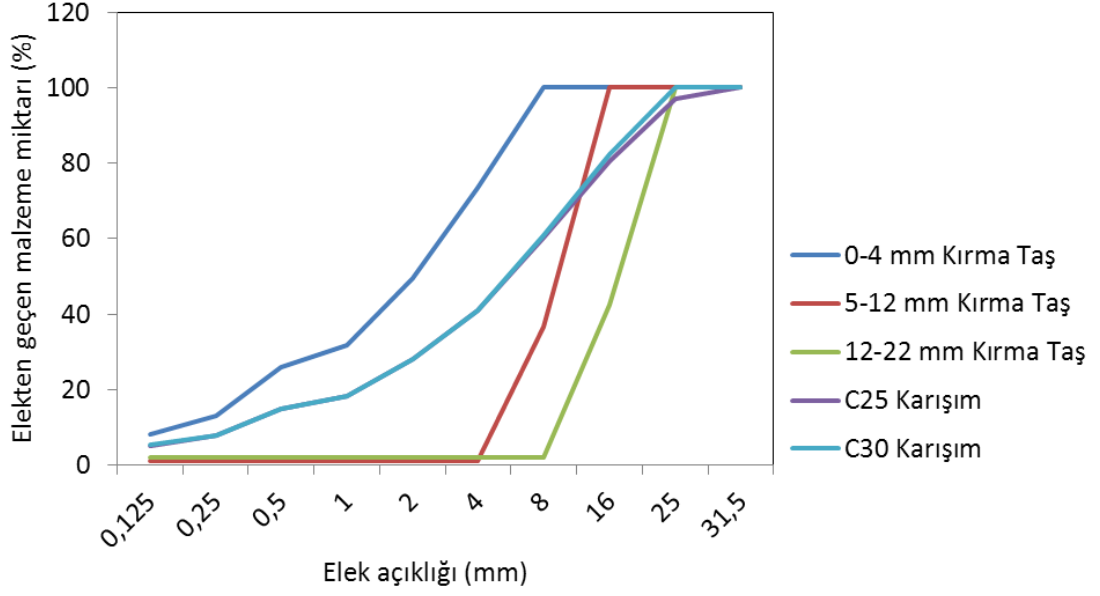
Özellik	Birim	Standart Değeri (TS EN 196-1)	Analiz Sonucu
Priz Başlangıcı	dk	≥60	161
Priz Sonu	dk	-	204
Özgöl Ağırlık	g/cm ³	-	3,16
Özgöl Yüzey	cm ² /g	-	3826
Hacim Genleşmesi	cm	≤10	1
2 Günlük Dayanım	MPa	≥20	28
28 Günlük Dayanım	MPa	42,5-62,5	57

7.1.2 Agrega

Beton üretiminde kullanılan agregaların elek analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 7.3 Beton üretiminde kullanılan agreganın elek analizi sonuçları

Elek (mm)	Elekten Geçen Miktar (%)				
	0-4 mm	5-12 mm	12-22 mm	C25	C30
31,5	-	-	-	-	-
25	100	100	100	97	100
16	100	100	42,6	80,4	82,2
8	100	36,7	2	60,4	60,8
4	73,3	1	2	41	41,1
2	49,6	1	2	28	28
1	31,9	1	2	18,3	18,3
0,5	25,8	1	2	14,9	15
0,25	13,2	1	2	8	8
0,125	8,2	1	2	5,2	5,3



Şekil 7.1 Beton üretiminde kullanılan agreganın granülasyon eğrisi

7.1.3 Uçucu Kül

Beton üretiminde kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki gibidir.

Çizelge 7.4 Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	Analiz Sonucu (%)	Bileşen	Analiz Sonucu (%)
SiO ₂	54,32	MgO	3,40
Al ₂ O ₃	25,40	Na ₂ O	0,28
Fe ₂ O ₃	7,80	K ₂ O	0,50
CaO	2,53	SO ₃	0,39

Çizelge 7.5 Uçucu kül fiziksel analiz sonuçları

Özgül Ağırlık	1,85 g/cm ³
İncelik	1805 cm ² /g
Granülasyon (45μ)	% 65

7.1.4 Karma Suyu

Beton üretiminde kullanılan karma suyu analizi TS EN 1008 standardı referans alınarak yapılmıştır.

Çizelge 7.6 Beton karma suyu analiz sonuçları

Bileşen	Analiz Sonucu
pH	7,45
Toplam Alkali (mg/l)	240
Klorür (Cl^{-2}) (mg/l)	170
Sodyum (Na^{+1}) (mg/l)	60,95
Kurşun (Pb^{+2}) (mg/l)	0,006
Çinko (Zn^{+2}) (mg/l)	0,004
Nitrat (NO_3^{-}) (mg/l)	0,32
Nitrit (NO_2^{-2}) (mg/l)	0,002
Toplam Sertlik (mg/l)	370
Koku	Yok
Renk	Berrak
Askıda Katı Madde İçeriği (ml)	3,2
Organik Madde	Oluşan renk standart renkten açıktır

7.2 Beton Dizaynı ve Karışım Oranları

Beton üretiminde dört farklı karışım oranı kullanılmıştır. 1 numaralı karışım C25 beton üretimi için Çizelge 7.7’de verilen dizayn kullanılmıştır. 2 numaralı karışım C30 beton üretimi için Çizelge 7.8’de verilen dizayn kullanılmıştır. 3 numaralı karışım C25 beton üretimi için kullanılan oranlarda %4 çimentonun, %100 uçucu külün ve %10 oranında ince agreganın yerine çelikhane cürufu kullanılmıştır (Çizelge 7.9). 4 nolu

karışımında C30 beton üretimi için kullanılan oranlarda %100 uçucu külün ve %10 oranında ince agreganın yerine çelikhane cürufu kullanılmıştır (Çizelge 7.10).

Çizelge 7.7 C25 beton üretimi için kullanılan 1 nolu beton dizaynı (1 m³ için)

Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	0-4 mm Kırma Taş (kg)	5-12 mm Kırma Taş (kg)	12-22 mm Kırma Taş (kg)
230	70	180	1011,3	242,7	541,3

Çizelge 7.8 C30 beton üretimi için kullanılan 2 nolu beton dizaynı (1 m³ için)

Çimento (kg)	Uçucu Kül (kg)	Su (kg)	0-4 mm Kırma Taş (kg)	5-12 mm Kırma Taş (kg)	12-22 mm Kırma Taş (kg)
270	70	176,8	996,6	257,5	570,2

Çizelge 7.9 C25 beton dizaynına çelikhane cürufu eklenerek üretilen 3 nolu beton dizaynı (1 m³ için)

Çimento (kg)	Su (kg)	Cüruf (kg)	0-4 mm Kırma Taş (kg)	5-12 mm Kırma Taş (kg)	12-22 mm Kırma Taş (kg)
220	180	181,13	910,17	242,7	541,3

Çizelge 7.10 C30 beton dizaynına çelikhane cürufu eklenerek üretilen 4 nolu beton dizaynı (1 m³ için)

Çimento (kg)	Su (kg)	Cüruf (kg)	0-4 mm Kırma Taş (kg)	5-12 mm Kırma Taş (kg)	12-22 mm Kırma Taş (kg)
270	176,8	169,6	897	257,5	570,2

Betonların karıştırılmasında 135 litre kapasiteli davul mikser kullanılmıştır. Beton karışımında istenilen kıvam elde edildikten sonra taze beton numuneleri 15×15×15 cm³'lük 6'şar adet küp kalıba yerleştirilmiştir. Kalıplar içinde 1 gün bekletilen numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra su sıcaklığı 23±2°C'de ayarlı kür havuzunda 3, 7, 28 gün bekletilerek basma dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 7.2 Beton üretiminde kullanılan davul mikser



Şekil 7.3 Küp kalıba yerleştirilmiş beton numuneleri

7.3 Beton Basma Dayanımları

Sertleşmiş beton numunelerinin basma dayanımları TS EN 206-1 standardı referans alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.4 Beton numunelerinin bekletildiği $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de ayarlı kür havuzu

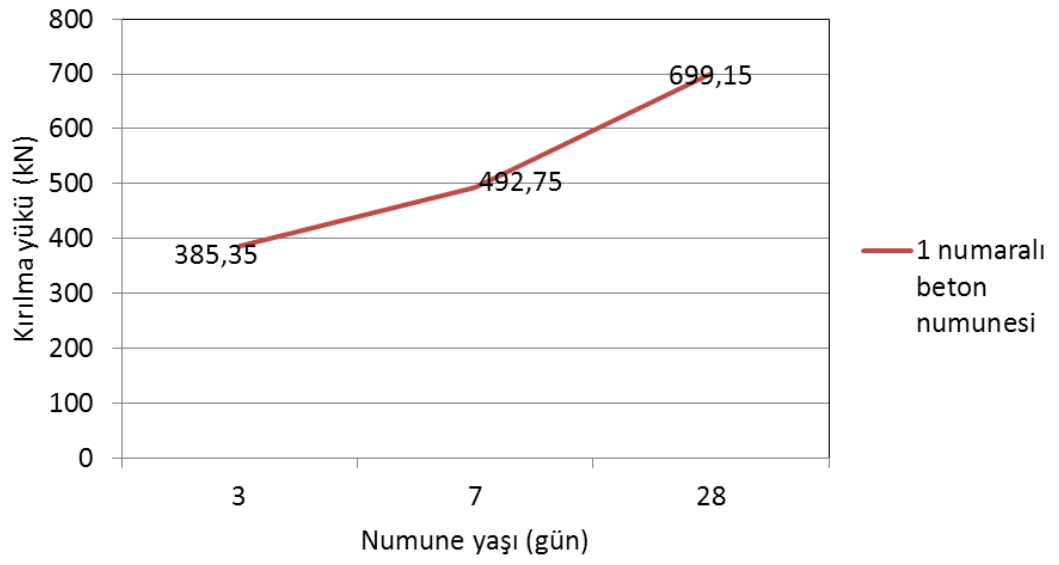


Şekil 7.5 Beton pres makinası

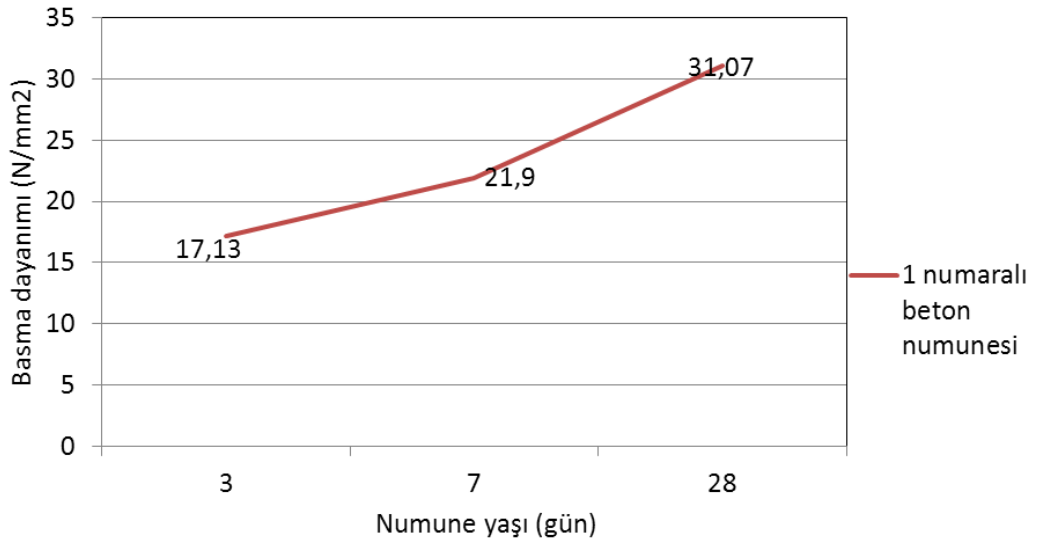
Çizelge 7.11, Çizelge 7.12, Çizelge 7.13 ve Çizelge 7.14’de sırasıyla 1 nolu, 2 nolu, 3 nolu ve 4 nolu beton numunelerine ait basma dayanımları sonuçları verilmiştir. Her birim bekleme süresi için 2’şer adet numunenin basma dayanımı incelenmiş ve ortalaması alınmıştır. Grafiklerde ortalama değerler kullanılmıştır.

Çizelge 7.11 1 numaralı beton numunesi (C25) basma dayanımı sonuçları

Numune	Numune Yaşı (gün)	Kesit Alanı (mm ²)	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (N/mm ²)
A	3	22500	7990	2,37	380,5	16,91
B	3	22500	8020	2,38	390,2	17,34
A,B _(ort)	3	22500	8005	2,37	385,35	17,13
C	7	22500	7995	2,37	484,4	21,53
D	7	22500	8000	2,37	501,1	22,27
C,D _(ort)	7	22500	7997,5	2,37	492,75	21,9
E	28	22500	7990	2,37	695,1	30,89
F	28	22500	7995	2,37	703,2	31,25
E,F _(ort)	28	22500	7992,5	2,37	699,15	31,07



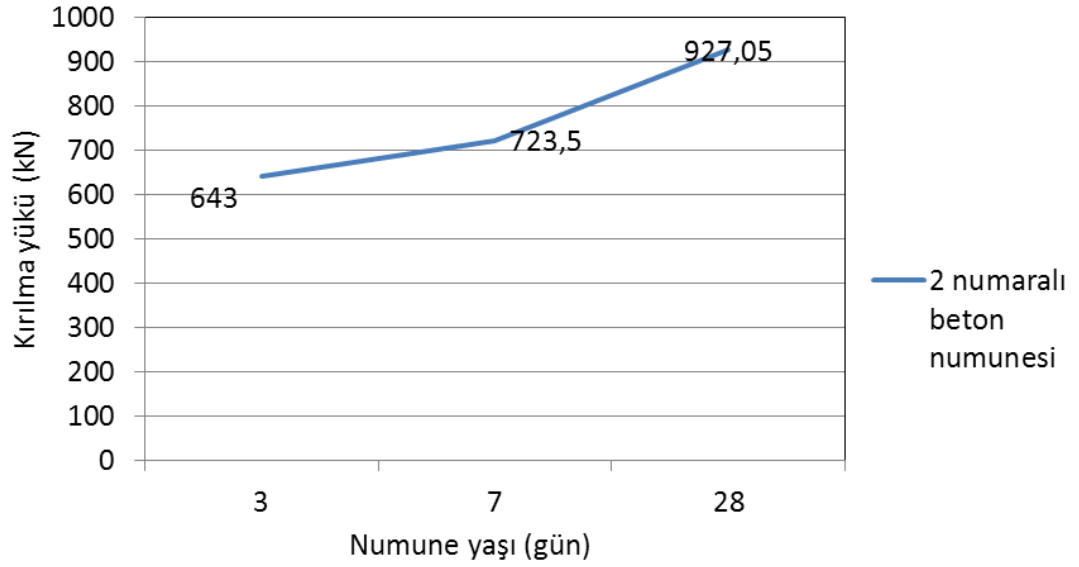
Şekil 7.6 1 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği



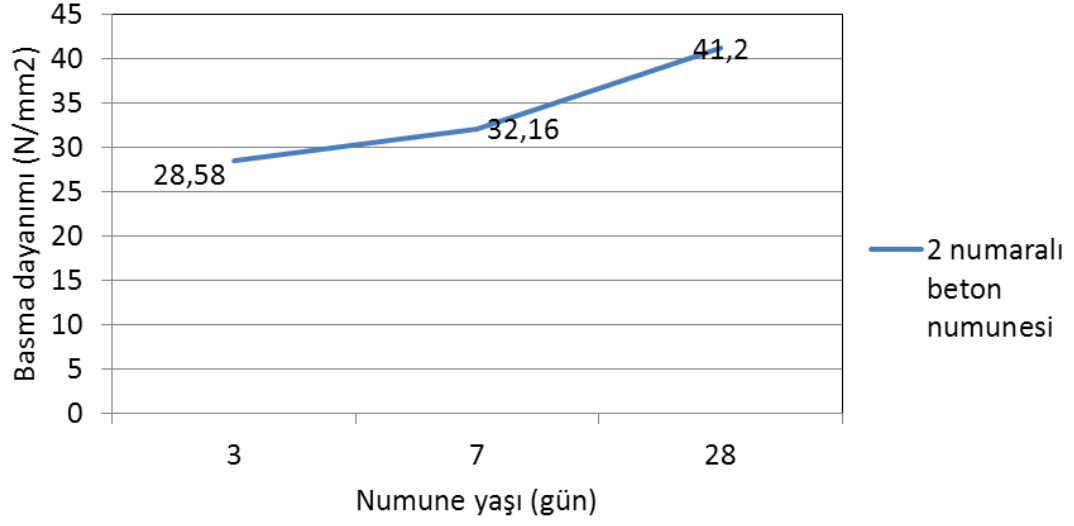
Şekil 7.7 1 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği

Çizelge 7.12 2 numaralı beton numunesi (C30) basma dayanımı sonuçları

Numune	Numune Yaşı (gün)	Kesit Alanı (mm ²)	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (N/mm ²)
A	3	22500	7970	2,36	650,7	28,92
B	3	22500	7950	2,36	635,3	28,24
A,B _(ort)	3	22500	7985	2,37	643	28,58
C	7	22500	7964	2,36	712,8	31,68
D	7	22500	7968	2,36	734,2	32,63
C,D _(ort)	7	22500	7966	2,36	723,5	32,16
E	28	22500	7940	2,35	962	42,76
F	28	22500	7926	2,35	892,1	39,65
E,F _(ort)	28	22500	7933	2,35	927,05	41,20



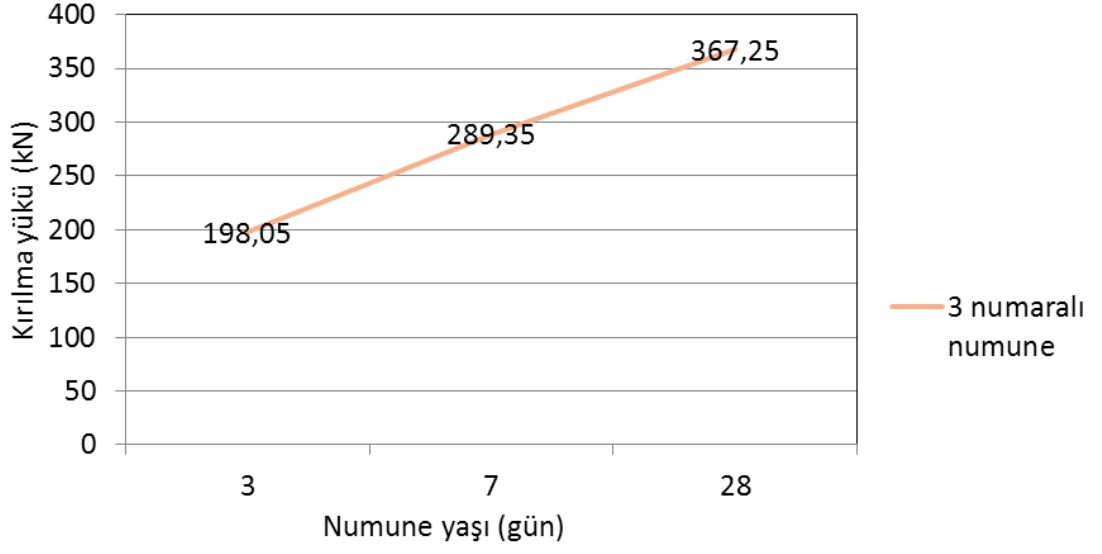
Şekil 7.8 2 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği



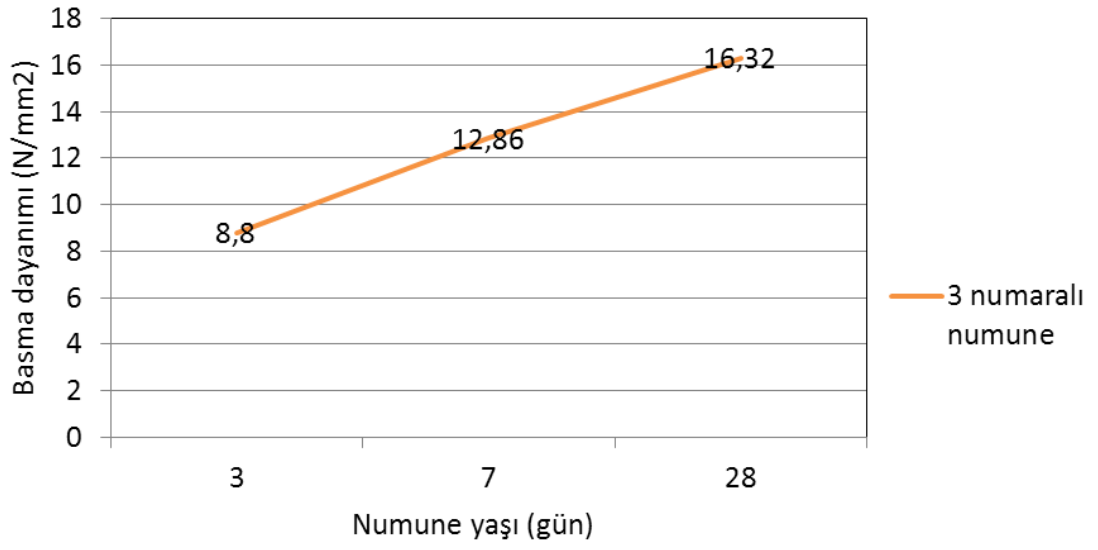
Şekil 7.9 2 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği

Çizelge 7.13 3 numaralı beton numunesi (C25 cüruflu) basma dayanımı sonuçları

Numune	Numune Yaşı (gün)	Kesit Alanı (mm ²)	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (N/mm ²)
A	3	22500	8100	2,40	235,2	10,45
B	3	22500	8026	2,38	160,9	7,15
A,B _(ort)	3	22500	8063	2,39	198,05	8,80
C	7	22500	8010	2,37	295,4	13,13
D	7	22500	7908	2,34	283,3	12,59
C,D _(ort)	7	22500	7959	2,36	289,35	12,86
D	28	22500	8020	2,38	350,1	15,56
E	28	22500	8031	2,38	384,4	17,08
D,E _(ort)	28	22500	8026	2,38	367,25	16,32



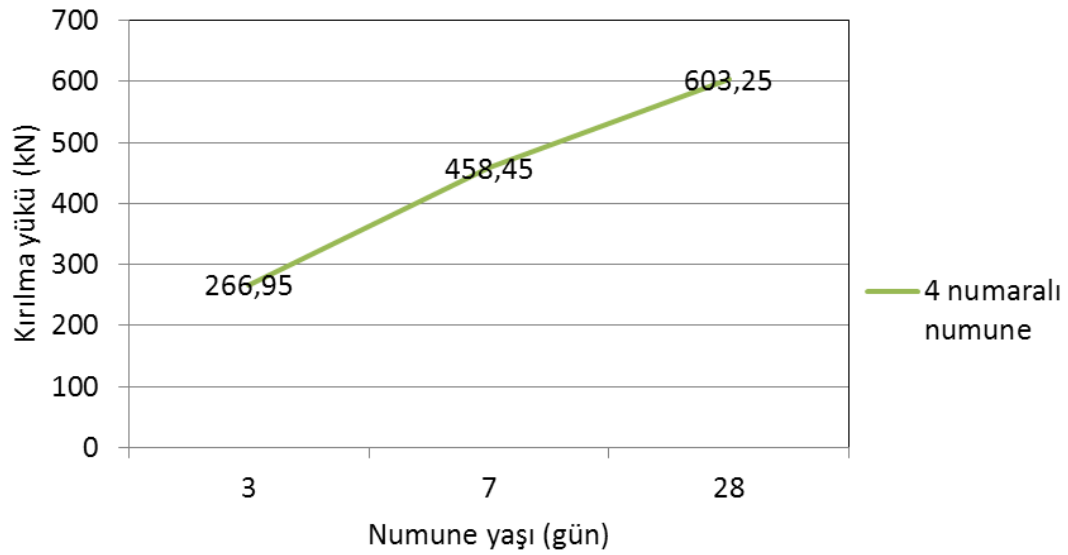
Şekil 7.10 3 numaralı beton numunesi gün-yük grafiği



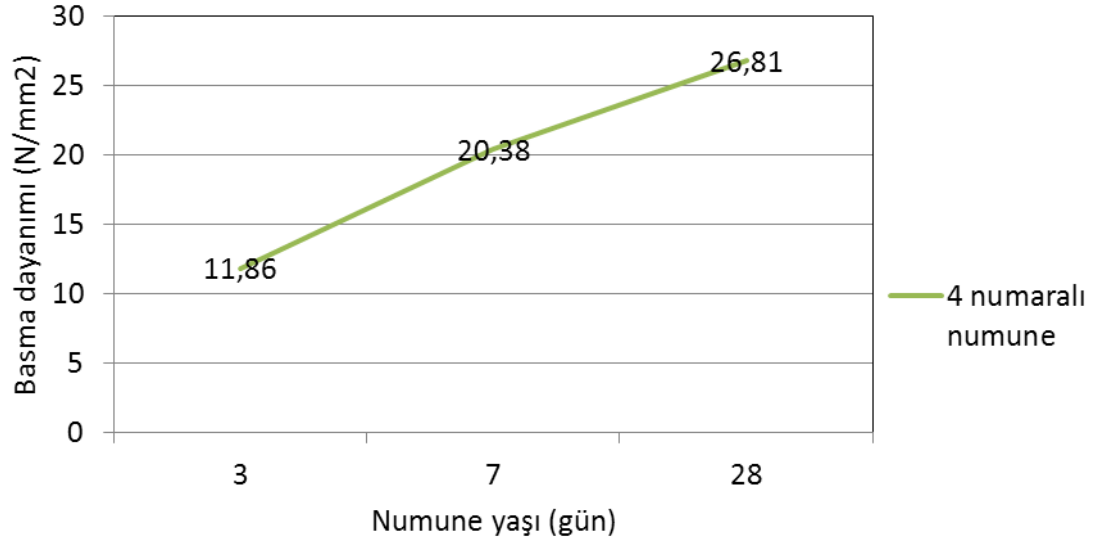
Şekil 7.11 3 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği

Çizelge 7.14 4 numaralı beton numunesi (C30 cüruflu) basma dayanımı sonuçları

Numune	Numune Yaşı (gün)	Kesit Alanı (mm ²)	Ağırlık (gr)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)	Kırılma Yüğü (kN)	Dayanım (N/mm ²)
A	3	22500	8128	2,41	258,1	11,47
B	3	22500	8133	2,41	275,8	12,26
A,B _(ort)	3	22500	8130,5	2,41	266,95	11,86
C	7	22500	8017	2,38	462,8	20,57
D	7	22500	7989	2,37	454,1	20,18
C,D _(ort)	7	22500	8003	2,37	458,45	20,38
D	28	22500	8163	2,42	611,5	27,18
E	28	22500	8109	2,40	595	26,44
D,E _(ort)	28	22500	8136	2,41	603,25	26,81



Şekil 7.12 4 numaralı beton numunesi gün-yük grafiğı



Şekil 7.13 4 numaralı beton numunesi gün-basma dayanımı grafiği

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelikhane cürufu malzemesi kullanılarak TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre “asitte çözünebilir sülfat içeriği deneyi, kükürt içeriği deneyi, suda çözünebilir klorür tuzları içeriği deneyi, humus içeriği deneyi ve hafif kirletici miktarı içeriği deneyi” yapılmıştır. Ayrıca cüruf numunelerine kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF ve XRD deneyleri yapılmıştır. Cüruf malzemelerine fiziksel ve mekanik deneyler olarak TS EN 933-1 standardına göre elek analizi (granülometri) deneyi yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Cüruf numunesinin asitte çözünebilen sülfat içeriği yüzdesi kütlece %0,593 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuç %0,8’den küçük olduğu için, TS 706 EN 12620 standardına göre AS_{0,8} kategorisine girdiği ve agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Cüruf numunesinin toplam kükürt içeriği yüzdesi kütlece %0,508 olarak belirlenmiştir. TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardında, cüruf agregaları için toplam kükürt içeriği değerinin S cinsinden %1 sınır değerini aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Deney sonucu, %1’den küçük olduğu için, TS 706 EN 12620 standardına göre, çelikhane cürufu numunesinin agrega olarak kullanımının uygun olduğu saptanmıştır.
- TS 706 EN 1260 standardına göre cüruf numunesinin suda çözünebilir klorür içeriği %0,01 sınır değerinin altında olduğu için agrega olarak kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

- Humus içeriği deneyi sonucunda oluşan rengin standart çözelti renginden açık olduğu görülmüştür. TS 706 EN 12620 standardına göre agrega humus içermemeli ve TS EN 1744-1 deney standardına göre yapılan humus içeriği deneyinin sonucunda oluşan rengin standart renkten açık olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle, cürufun agrega olarak kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir.
- TS 706 EN 12620 standardına göre hafif kirletici miktarı normal olarak ince agregalarda %0,5'i, iri agregalarda %0,1'i geçmemelidir. Ancak betonun yüzeyinin önemli olduğu durumlarda ince agreganın %0,25'ini ve iri agreganın %0,05'ini geçmemesi gerekmektedir. Cüruf malzemesinin hafif kirletici miktarı %0,0025 olarak belirlenmiş olup, sınır değerlerin altında bulunmuştur.
- Elek analizi deneyi sonucunda, cüruf numunesinin maksimum 16,5mm'ye göre hazırlanmış olan referans granülometri eğrisi değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.
- XRF analizi sonucuna göre çelikhane cürufu numunesi yüksek oranda demir, kalsiyum ve silisyum içermektedir. Ayrıca düşük oranda, mangan, titanyum ve potasyum içermektedir. Bazikliği 4,05'dir.
- XRD analizi sonucunda çelikhane cürufunun yapısında demirin, sülfatlar halinde bulunduğu ve alüminyum oksit fazının da var olduğu görülmüştür. Bu durum dayanımının yüksek olduğunu göstermektedir. Kalsiyum karbonat fazının bulunması, çelikhane cürufunun beton üretiminde kullanılması halinde genleşme miktarının fazla olacağını ifade etmektedir.

Çizelge 8.1 Elde edilen sonuçlar ve referans değerlerin karşılaştırılması

Bileşen	Deneyisel Çalışma Sonucu	İlgili Standart; Referans Değer
SO ₃ (%)	0,593	TS 706 EN 12620; <%0,8
S (%)	0,508	TS 706 EN 12620; <%1
Suda Çözünebilir Klorür İçeriği (%)	0,0025	TS 706 EN 1260; <%0,01
Humus İçeriği	Açık Renk	TS EN 1744-1; Açık Renk
Hafif Kirletici Miktarı (%)	0,0025	TS 706 EN 12620; %0,5-%0,1

Beton agregası olarak kullanımının TS 706 EN 12620 “Beton Agregaları” standardına göre uygun olduğu belirlenen çelikhane cürufu, farklı karışım oranlarında C25 ve C30 beton üretiminde kullanılmış olup elde edilen sonuçlar aşağıdadır:

- %4 çimentonun, %100 uçucu külün ve %10 oranında ince agreganın yerine çelikhane cürufu kullanılarak üretilen C25 sınıfı betonun 28 günlük basma dayanımı $16,32 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Elde edilen basma dayanımı sonuçlarına göre C16/20 beton sınıfına girmektedir.
- %100 uçucu külün ve %10 oranında ince agreganın yerine çelikhane cürufu kullanılarak üretilen C30 sınıfı betonun 28 günlük basma dayanımı $26,81 \text{ N/mm}^2$ bulunmuştur. Elde edilen basma dayanımı sonuçlarına göre C20/25 beton sınıfına girmektedir.

Yüksek fırın cürufu agrega olarak yaygın bir kullanım alanına sahipken, çelikhane cürufunun beton agregası olarak kullanımı ile ilgili uygulamalar oldukça kısıtlıdır. Bunun temel nedeni de iki cüruf arasındaki baziklik oranının birbirinden farklı olmasıdır. Yapılan deneysel çalışmalarda da çelikhane cürufunun agrega standart değerlerini sağladığı tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucu alınan ilk dayanım değerlerinin beklenenden düşük olmasına rağmen iyileştirilebileceği ve uzun dönem sonuçları ile birlikte değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yapılan tez çalışması bundan sonraki çalışmalara ışık tutacaktır. Elde edilen değerler geliştirilerek üretime devam edilecek, demir çelik sektöründe bir atık türü olarak açığa çıkan çelikhane cürufunun değerlendirilmesi ile ülke ekonomisine büyük oranda katkı sağlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] TS EN 197-1, (2002). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [2] Özgür, S., (1996). Türkiye Çimento Sanayii ve Üretilen Çimento Türleri, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [3] Kosmatka, S.H.,vePanarese, W.C., (1995). "Design and Control of Concrete Mixtures", Sixth Canadian Edition, Canadian Portland Cement Association.
- [4] Gülen, Ş. ve Yalap, H., (2003). "Çimento Sektörüne Genel Bir Bakış", Türkiye Kömür İşletmeleri Yayınları.
- [5] Özkul, H., Taşdemir, M. A., Tokyay, M. ve Uyan, M., (1999). Her Yönüyle Beton, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- [6] Monshia, A. ve Asgaranib, M. K., (1999). "Producing Portland Cement from Iron and Steel Slag sand Limestone", Cement and Concrete Research, 29: 1373-1377.
- [7] Das, B., Prakash, S., Reddy, P. S.R. ve Misra, V. N., (2007). "An Overview of Utilization of Slag and Sludge from Steel Industries", Resources, Conservation and Recycling 50: 40-57.
- [8] Modern Mimari Mimarlık ve Mühendislik, Çimento Türleri ve Çimentonun Ana Maddeleri – Portland Çimentosu, <http://www.modernmimari.com/mimarlik-ve-muhendislik/insaat-malzemeleri/846-cimento-turleri-ve-cimentonun-ana-maddeleri.html>, 23 Ağustos 2011.
- [9] Çetin, G., Çimento, <http://www.guvencetin.com/Cimento/index.htm>, 23 Ağustos 2011.
- [10] Kocataşkın, F.,(1991).“Betonun Dünü Bugünü Yarını”, 2. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 23-42.
- [11] Erdoğan, Y.T.,(1995). Beton Oluşturan Malzemeler Agregalar, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.
- [12] Erdoğan, T. Y., (2002). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.

- [13] Apaydın, S., (2007). Farklı Kökenli Agregaların Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] TS 706 EN 12620+A1, (2009). Beton Agregaları, TSE, 2. Baskı, Ankara.
- [15] Şimşek, O., (2004). Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [16] Postacioğlu, B., (1987). Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton, Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [17] ASTM C 29, (1994). Standard Test Method For Specific Gravity and Unit Weight and Voids in Aggregate, Annual Book of ASTM Standards.
- [18] Neville, A.M., (1981). Properties Of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical.
- [19] Saran, A. G., (2007). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20] TS EN 1008, (2003). Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [21] Anwar, I. I., (2010). Katkıların Beton Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22] Eren, E., (2009). Farklı Cüruf Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] ACI Committee, (1987). "Use of FlyAsh in Concrete", ACI Materials Journal, 381-409.
- [24] Ahmaruzzaman, M., (2010). "A Review on The Utilization of Fly Ash", Progress in Energy and Combustion Science, 36: 327-363.
- [25] Tuğrul, N., (2005). Bandırma Etibank Sülfürik Asit Fabrikasından Çıkan Kalsine Pirit Külünün Yüksek Fırın Hammaddesi Olarak Değerlendirilmesi Ve Pik Demir Üretiminde Kullanılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Özturan, T.,(1993). Uluslararası 4. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 57-78.
- [27] ACI Committee, (1992). "Guide for The Use of Silica Fume in Concrete", American Concrete Institute, Detroit, 234.
- [28] TS EN 206, (2002). Beton-Bölüm: 1, Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [29] Kalite Kontrol, İnşaat-Beton Katkı Maddeleri, Kimyasal Katkılar, <http://www.kalitekontrol.org/beton/beton-katki-maddeleri.html>, 28 Ağustos 2010.

- [30] Gülşahin, S. ve Akkaya, Y., (2006). Taze Betonda Segregasyonun Ölçülmesi ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi, Sika Teknik Bülten, 2, İstanbul.
- [31] Erdoğan, T.Y.,(2003). Beton, O.D.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü Matbaası, Ankara.
- [32] Wong, G. S., Alexander, M., Haskings, R., Poole, T. S., Malone, P. G. ve Wakeley, L., (2000). Portland-Cement Concrete Rheology and Workability: Final Report, Los Angeles.
- [33] Gülşahin, S., (2006). Taze Betonda Segregasyonun Ölçülmesi ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [34] TS EN 206-1, (2002). Beton-Bölüm 1: Özellik, İmalat ve Uygunluk, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [35] Açar, E., Öztaş, G. ve Süttaş, İ., (1998). Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [36] ACI Committee 116, (1994). "Cement and Concrete Terminology", ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.
- [37] Ersoy, U.,(1985). Betonarme, Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, 3. Basım, Evrim Yayınevi, İstanbul.
- [38] Mehta, P. K. ve Monteiro P.J.M., (1997). Concrete Microstructure, Properties and Materials. Chapter: 8, Admixtures, Indian Concrete Institute, 256-271, Chennai.
- [39] Yeğinboğalı, A.,(1999). Betonun Dayanıklılığı, Çimento ve Beton Araştırma Geliştirme, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayınları, 1-21, Ankara.
- [40] Engin, Y., Beton ile İlgili Yaşanabilecek Problemler, <http://www.thbb.org/Default.aspx>, 12 Eylül 2011.
- [41] Doğa Teknik, Betonda Karşılaşılan Sorunlar, <http://www.dogateknik.com.tr/Teknik-Belgeler/Betonda-Karsilasilan-Sorunlar.pdf>, 12 Eylül 2011.
- [42] Ilica, T., (2008). Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi ve Klorür Geçirimsizliği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] Yıldırım, K. ve Sümer, M., Deniz Yakın Ortamda Beton Korozyonu, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/11155.pdf>, 13 Eylül 2011.
- [44] İnşaatıca, Yapı Malzemeleri-Beton-Betona Asitlerin Etkisi, <http://www.inaatmuhendisligi.net/index.php?topic=1227.0>, 13 Eylül 2011.
- [45] Akman, M. S., Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri, <http://www.e-kutuphane.imo.org.tr/pdf/12639.pdf>, 14 Eylül 2011.
- [46] Forum Maden, Betonun Sünme ve Büzülme Davranışı, <http://www.forumaden.com/forum/cimento-78/betonun-rotre-ve-sunmesi-davranisi/>, 21 Eylül 2011.

- [47] Kourounis, A., Tsivilis, S., Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D. ve Tsibouki, Z., (2007). "Properties and Hydration of Blended Cements with Steelmaking Slag", Cement and Concrete Research, 37: 815-822.
- [48] Türkiye Çimento Mühtasilleri Birliği, (2001). Cüruflar ve Cürüflu Çimentolar, Ankara.
- [49] Qiang, W. ve Peiyu, Y. (2010). "Hydration Properties of Basic Oxygen Furnace Slag", Construction and Building Materials, 24: 1134-1140.
- [50] Xuequana, W., Hong, Z., Xinkai, H. ve Husen, L., (1999). "Study on Steel Slag and Fly Ash Composite Portland Cement", Cement and Concrete Research 29: 1103-1106.
- [51] TS EN 1744-1, (2010). Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Kimyasal Analiz, TSE, 2. Baskı, Ankara.
- [52] TS 3530 EN 933-1, (1999). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini-Elleme Metodu, TSE, 1. Baskı, Ankara.
- [53] Özkan, Ö., (2006). "Çelikhane ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Portland Çimentosunun Özellikleri", İMO Teknik Dergi, 3893-3902, Yazı 257.
- [54] Tsakiridis, P. E., Papadimitriou, G. D., Tsivilis, S. ve Koroneos, C., (2008). "Utilization of Steel Slag for Portland Cement Clinker Production", Journal of Hazardous Materials, 152: 805-811.
- [55] Monshia, A. ve Asgaranib, M. K., (1999). "Producing Portland Cement from Iron and Steel Slags and Limestone", Cement and Concrete Research, 29: 1373-1377.
- [56] Xuequana, W., Hong, Z., Xinkai, H. ve Husen, L., (1999). "Study on Steel Slag and Fly Ash Composite Portland Cement", Cement and Concrete Research 29: 1103-1106.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : SOYSAL Burcu
Doğum Tarihi ve Yeri : 29/07/1987 Karabük
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : soysalburcu@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kimya Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009 - Devam
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lisans	Kimya Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen Bilimleri	75. Yıl Karabük Anadolu Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 – Devam	İskenderun Demir ve Çelik A.Ş	Yönetim Sistemleri Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. **Soysal, B.** ve Möröydor Derun, E., (2012). “Çelikhane Cürufunun Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi”, 16. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 13-15 Eylül 2012, İstanbul.